

# Optimierung einer induktiven Energiever- sorgungsinfrastruktur für den urbanen Straßenverkehr

Tamás Kurczveil

Mit der Abkehr von fossilen Energieträgern müssen gegenüber den heutigen Versorgungskonzepten die Nachteile geringer Energiedichten durch betriebliche sowie infrastrukturelle Optimierungsmaßnahmen kompensiert werden. Neben der Entwicklung von Übertragungstechnologien muss einerseits untersucht werden, welche Energiemengen für den Verkehrsbetrieb in konkreten Szenarien notwendig sind. Mit einer detaillierten Analyse des Verkehrsbetriebs lässt sich darüber hinaus untersuchen, wie sich die Prozesse der Energieübertragung optimal in den Verkehrsbetrieb eingliedern lassen. Andererseits können daraus Anforderungen an die Energieerzeuger und künftige Übertragungsinfrastrukturen abgeleitet werden, um die zunehmende Versorgung von Verkehrsteilnehmern über diese zu ermöglichen.

In dieser Dissertation wird ein Verfahren vorgestellt, das auf Basis kalibrierter und mikroskopisch simulierter Verkehrsszenarien eine Standortoptimierung der Energieversorgungsinfrastruktur ermöglicht, um Fahrzeugen eine zuverlässige Energiebereitstellung zu gewährleisten. Als Beispiel wird die Errichtung einer induktiven Ladeinfrastruktur zur Versorgung des städtischen Straßenverkehrs betrachtet.

**Tamás Kurczveil** absolvierte 2008 das Studium der Elektrotechnik mit der Vertiefungsrichtung Automatisierungs- und Regelungstechnik an der Technischen Universität Dresden. Bis 2011 arbeitete er als Entwicklungsingenieur im Bereich der Getriebeentwicklung für Hybridfahrzeuge bei iav in Berlin. Diese Dissertation entstand während seiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Braunschweig.



# **Optimierung einer induktiven Energieversorgungs- infrastruktur für den urbanen Straßenverkehr**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Tamás Kurczveil  
aus: Gyöngyös, Ungarn

eingereicht am: 09.03.2017  
mündliche Prüfung am: 30.05.2017

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Eckehard Schnieder  
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich

**Deckblatt:**

© Arthur Pfau: Nachtaufnahme der Tankstelle *Guter Hirte* der 1950er Jahre in Ludwigshafen Oggersheim; mit freundlicher Genehmigung durch Christof Pfau

# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Mit der Abkehr von fossilen Kraftstoffen steht unsere Mobilität vor einem Umbruch. Um umweltpolitische Ziele einzuhalten und Feinstaub- sowie Lärmbelastung zu senken, sind nachhaltige Mobilitätslösungen und der Ausbau entsprechender Versorgungskonzepte erforderlich. In dieser Arbeit wird die optimierte Verortung einer induktiven Ladeinfrastruktur mit interdisziplinären Ansätzen, Modellen und Methoden untersucht. Ich bedanke mich an dieser Stelle bei allen, die mich bei der Erstellung meiner Dissertation fachlich, menschlich sowie moralisch unterstützt und somit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Eckehard Schnieder, dem ehemaligen Leiter des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, dessen Ideen und Visionen mir die Promotion ermöglichten. Mit seinen Anregungen hat er mir bei meinen Forschungsarbeiten stets den Weg gewiesen, auf dem ich meine eigenen Kenntnisse und Kompetenzen optimal einfließen lassen sowie meinen Wissensdurst weiter stillen konnte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich, dem Leiter des Instituts für Verkehr und Stadtbauwesen der Technischen Universität Braunschweig, danke ich für die Übernahme des Koreferats sowie für seine wertvollen fachlichen Hinweise im Vorgespräch. Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder, dem Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität Braunschweig, danke ich für seine freundliche Bereitschaft, den Vorsitz der Promotionskommission zu übernehmen.

Meinen ehemaligen Bürokollegen und Freunden Dr.-Ing. Patrick Diekhake, Dipl.-Ing. Felix Reinbold, Dipl.-Wirtsch.-Ing. René S. Hosse und Dirk Spiegel, M.Sc., danke ich für eine äußerst produktive Zusammenarbeit und ein angenehmes Arbeitsklima. Ich werde unsere gemeinsame Zeit stets in bester Erinnerung behalten und freue mich auf künftige berufliche Berührungspunkte sowie viele gemeinsame Treffen.

Bei meinen Forschungsaktivitäten konnte ich auf eine Reihe exzellenter Arbeiten ehemaliger Mitarbeiter des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik zurückgreifen, die mir einen sehr guten Einstieg in verschiedene Forschungsthemen geboten haben. Besonders hervorheben möchte ich hierbei die Dissertationen von Dr.-Ing. Stefan Detering und Dr.-Ing. Stefan Wegele, denen ich für ihre hervorragenden und lesenswerten Vorarbeiten danke.

Zahlreiche studentische Hilfskräfte haben mich mit ihrer Zuarbeit wissenschaftlich unterstützt. Johannes Callegari, M.Sc., und Arne Geffert, M.Sc., möchte ich an dieser Stelle besonders hervorheben und ihnen für ihre motiviert und eigenständig erarbeiteten Ergebnisse danken, die weit über das geforderte Maß hinausgingen und mit denen sie mich stark entlastet haben.

In den vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur geförderten Projekten *emil* und *InduktivLaden* boten sich mir hervorragende Rahmenbedingungen für das wissenschaftliche

Arbeiten. Ich möchte allen Projektpartnern danken, besonders meinen Kollegen Frank Soyck, M.Eng., Tim-Hendrik Dietrich, M.Sc., sowie Dipl.-Ing. Jonas Wussow, mit denen mir die Zusammenarbeit trotz vieler unerwarteter Herausforderungen stets sehr viel Freude bereitet hat. Mein Dank gilt auch dem Leiter beider Projekte, Herrn Frank Brandt, Prokurist bei der Braunschweiger Verkehrs-GmbH, dessen Offenheit gegenüber technischen Neuentwicklungen sowie wissenschaftlichen Aufgabenstellungen die Projekte erst ermöglicht hat. Mit einem gewaltigen Maß an Hilfsbereitschaft und Unterstützung hat er einen erheblichen Anteil zum wirtschaftlichen sowie wissenschaftlichen Erfolg der beiden Projekte beigetragen.

Meine Tante Raine und mein Onkel Stephen de Keczer haben meinen Geschwistern und mir die Möglichkeit geboten, sehr lang – in Summe über 30 Jahre – bei sich im Silicon Valley zu wohnen. Wir wurden von ihnen und ihrer Familie wie die eigenen Kinder und Geschwister aufgenommen. Ich danke ihnen für ihre Herzlichkeit und Unterstützung sowie für die Werte, die sie mir in einem recht kurzen aber sehr prägenden Abschnitt meines Lebens vermittelt haben.

Ebenso herzlich wurde ich von meinen Schwiegereltern Susanne und Hartmut Hübner aufgenommen. Ich danke ihnen für ihre vielfältige und vor allem herzliche Hilfe und Unterstützung in den letzten Jahren, besonders im liebevollen Umgang mit ihren Enkeltöchtern Tilda und Felia.

Meine Eltern haben im Jahr 1988 den Entschluss gefasst, aus Ungarn auszuwandern. Ich danke ihnen für den Mut, dort sehr viel von dem zurückgelassen zu haben, was sie sich zuvor unter einem kommunistischen Regime sehr hart erarbeitet haben. Meinen Geschwistern Zoltán und Géza und mir hat sich damit eine Fülle neuer Möglichkeiten geboten, die unser Leben massiv positiv geprägt haben. Ich danke meinen Eltern auch für die vermittelten Einstellungen und Werte sowie für die unterstützende Begleitung auf meinem bisherigen Lebensweg.

Meinen Geschwistern Zoltán und Géza danke ich für ihre unermessliche Hilfe und tatkräftige Unterstützung in unzähligen Lebenssituationen. Ich hoffe, dass wir in diesem Leben noch einmal die Gelegenheit bekommen werden, näher beieinander statt über mehrere Kontinente verteilt zu wohnen.

Größter Dank gilt meiner lieben Frau Lydia und meinen wundervollen Töchtern Tilda und Felia. Während der Erstellung dieser Arbeit haben sie mir, trotz der vielen Abende und Wochenenden an denen sie auf mich verzichten mussten, stets ein enormes Maß an Motivation sowie den nötigen Halt geboten.

# Kurzfassung

Mit sinkenden fossilen Energiereserven und weltweit steigendem Mobilitätsbedarf steht unserer Gesellschaft auf lange Sicht die Abkehr von fossilen Energieträgern bevor. Die Energiedichte von alternativen Energieträgern liegt deutlich unter der von Erdöl. Bei deren Anwendung muss berücksichtigt werden, dass das vollständige Betanken von Straßenfahrzeugen viel länger dauert und die übertragene Energiemenge für deutlich kürzere Distanzen reicht, als man es von heutigen Fahrzeugen gewohnt ist, die mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden. Zur Aufrechterhaltung der Mobilität und schnellen Nutzerakzeptanz müssen die Folgen dieser Umstellung untersucht sowie Anforderungen und Maßnahmen abgeleitet werden, um die Einschränkungen des Verkehrsbetriebs zu minimieren. Aufgrund der global zunehmenden Urbanisierung wird der Fokus dieser Arbeit auf den städtischen Verkehr gelegt, der bereits heute über 75 % der Verkehrsleistung in Deutschland ausmacht.

In dieser Arbeit wird sich der Fragestellung gewidmet, wie viel Energie der Straßenverkehrsbetrieb erfordert und welchen Anforderungen die Energieübertragung genügen muss, damit künftig zu berücksichtigende Prozesse für die Energieversorgung ohne Einschränkungen für Teilnehmer in den Verkehr integriert werden können. Als Grundlage für die Verkehrsbetrachtungen dienen mikroskopisch simulierte Verkehrsszenarien, deren Modelle mit Verkehrs- und Fahrzeugmessdaten kalibriert werden. Darüber hinaus wird ein zeitdiskretes Modell für die Berechnung des Fahrzeugenergiebedarfs vorgestellt und in ein mikroskopisches Verkehrssimulationswerkzeug implementiert. Die Simulationsdaten münden anschließend in einem linearen Programm, welches unter Berücksichtigung der Ladeleistung und weiteren betrieblichen Randbedingungen mit geeigneten Methoden die Anordnung der Ladestellen optimiert. Abschließend wird das vorgestellte Verfahren beispielhaft an der zu optimierenden Verortung der Komponenten einer induktiven Energieversorgungsinfrastruktur präsentiert.

Der Neuheitsgrad dieser Arbeit besteht in dem Ansatz, dass durch die geeignete Positionierung von Ladestellen der Verkehr während seines Betriebs mit der erforderlichen Energie versorgt wird. Die Anordnung einer neu in Betrieb zu nehmenden Infrastruktur wird auf den vorherrschenden Verkehr ausgelegt und optimiert. Trotz deutlich geringerer Fahrzeugreichweiten und Übertragungsleistungen als mit heutigen Fahrzeugen müssen Fahrer nach der erfolgten infrastrukturellen Optimierung bei ihrer Routenwahl keine dedizierten Halte für die Energieübertrag berücksichtigen. Städteplanern sowie Infrastruktur- und Flottenbetreibern wird damit erstmals ein Werkzeug und ein Verfahren zur Verfügung gestellt, mit dem vorherrschende oder zukünftige Szenarien hinsichtlich Verkehrsaufkommen und Energiebereitstellung integriert analysiert werden können.



# Abstract

Diminishing crude oil supplies will inevitably require the development and application of alternatives that fuel the globally increasing demand for mobility. Since the energy density of alternative energy carriers is very low compared to crude oil, the migration will be accompanied with drawbacks in user comfort like that of fully charging a vehicle in less than two minutes or of travelling distances of several hundred kilometers with a single charge. For the quick acceptance of new concepts, to maintain the current level of mobility, and to minimize the limitations on traffic operation, the consequences of using alternative energy carriers in road vehicles will have to be evaluated as well as requirements be formulated and measures be developed.

This thesis deals with the amount of energy that road traffic requires and with the requirements for the energy transfer in order to integrate charging processes into traffic operation with minimum limitations. The focus lies on urban traffic, which accounts for the majority of the global traffic volume. Microscopic traffic simulations build the basis for the traffic analyses that are calibrated with traffic and vehicle measurement data. A time-discrete model will be presented and implemented in a traffic simulation tool that allows the calculation of the energy demand in simulated vehicles. A linear program will be developed that uses the simulation results and optimizes the charging station locations in consideration of the charging power and other operational boundaries. The presented technique is applied in a final step to determine the optimal arrangement of a charging infrastructure to adequately supply road traffic vehicles.

The novelty of this work lies in the fact that the optimal placement of charging stations allows the integration of charging processes into traffic operation. The arrangement of the charging infrastructure is designed and optimized for prevailing traffic. It will be shown that vehicles with even lower driving ranges than today's vehicles will not require dedicated charging halts along their routes that interrupt their operations. City planners as well as infrastructure and fleet operators will further be provided with a tool and a method that allows the integrated analysis of future scenarios in regard of traffic volume and energy supply.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>iii</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>xiii</b>
<b>1. Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
1.1. Energieübertragung im Straßenverkehr . . . . .	3
1.2. Die Braunschweiger Projekte emil und InduktivLaden . . . . .	5
1.3. Motivation . . . . .	7
1.4. Zielsetzung und konzeptioneller Ansatz . . . . .	8
1.5. Struktur der Arbeit . . . . .	9
<b>2. Verkehrsmodellierung und -simulation</b>	<b>13</b>
2.1. Stand von Wissenschaft und Technik . . . . .	14
2.1.1. Makroskopische Verkehrsmodelle . . . . .	14
2.1.2. Mikroskopische Verkehrsmodelle . . . . .	15
2.1.3. Mesoskopische Verkehrsmodelle . . . . .	16
2.1.4. Nanoskopische Verkehrsmodelle . . . . .	16
2.2. Anforderungen an die Modellstruktur und ein Simulationswerkzeug . . . . .	17
2.3. Das Verkehrssimulationswerkzeug SUMO . . . . .	18
2.4. Modellierung der Verkehrskonstituenten mikroskopischer Verkehrsszenarien in SUMO . . . . .	20
2.4.1. Verkehrsinfrastruktur . . . . .	20
2.4.2. Verkehrsmittel . . . . .	30
2.4.3. Verkehrsnachfrage . . . . .	46
<b>3. Kalibrierung mikroskopischer Verkehrsszenarien</b>	<b>57</b>
3.1. Durchführung von Simulationsstudien . . . . .	57
3.2. Stand von Wissenschaft und Technik . . . . .	58
3.2.1. Kalibrierung und Validierung mit mikroskopischen Messdaten . . . . .	59
3.2.2. Kalibrierung und Validierung mit makroskopischen Messdaten . . . . .	61
3.2.3. Kalibrierung und Validierung mit mikroskopischen und makroskopischen Messdaten . . . . .	67
3.3. Anforderungen an die Kalibrierung und Validierung . . . . .	71

<b>4. Emissions- und Energiebedarfsmodellierung</b>	<b>75</b>
4.1. Stand von Wissenschaft und Technik . . . . .	75
4.1.1. Schadstoffemissionsmodelle . . . . .	76
4.1.2. Schallemissionsmodelle . . . . .	77
4.1.3. Kinematische Grundlagen für die Berechnung des Energiebedarfs . . . . .	80
4.2. Herleitung eines diskreten Energiemodells . . . . .	92
4.2.1. Mechanisches Teilmodell . . . . .	93
4.2.2. Elektrisches Teilmodell . . . . .	96
4.2.3. Systemstruktur und Energieflüsse . . . . .	98
4.2.4. Energiezufuhr . . . . .	99
4.2.5. Parametrierung . . . . .	100
4.2.6. Modellvalidierung . . . . .	103
4.2.7. Gegenüberstellung der Ergebnisse und Auswertung . . . . .	107
<b>5. Optimierung der Anordnung von Energieversorgungsinfrastrukturen</b>	<b>111</b>
5.1. Grundlagen der Optimierung . . . . .	111
5.1.1. Lineare Programmierung . . . . .	112
5.1.2. Konzeptionelle Lösungsstrategien für Optimierungsaufgaben . . . . .	113
5.1.3. Das Simplex-Verfahren . . . . .	118
5.2. Stand von Wissenschaft und Technik . . . . .	119
5.2.1. Das flow capturing location-allocation model nach Hodgson und Berman . . . . .	120
5.2.2. Umwege für das Erreichen von Ladestellen . . . . .	125
5.2.3. Begrenzte Fahrzeugreichweiten . . . . .	125
5.2.4. Zusätzliche Ladepunkte entlang von Kanten . . . . .	126
5.2.5. Begrenzte Kundenkapazität von Ladestellen . . . . .	127
5.2.6. Weitere Ansätze für die Standortoptimierung von Ladestellen . . . . .	128
5.3. Modell für die optimierte Positionierung von Ladestellen . . . . .	130
5.3.1. Anforderungen an das Modell . . . . .	130
5.3.2. Formulierung eines linearen Programms zur Ladestellenpositionierung . . . . .	131
<b>6. Modellierung eines Referenzszenarios</b>	<b>139</b>
6.1. Auswahl eines Untersuchungsraums . . . . .	139
6.2. Modellierung und Parametrierung der Verkehrsinfrastruktur . . . . .	140
6.3. Modellierung und Parametrierung der Verkehrsteilnehmer . . . . .	141
6.4. Modellierung und Parametrierung der Verkehrsnachfrage . . . . .	141
6.5. Makro- und mikroskopische Kalibrierung . . . . .	144
6.5.1. Makroskopische Kalibrierung der Routenwahl (Schritt a) . . . . .	145
6.5.2. Mikroskopische Kalibrierung auf mittlere ÖPNV-Fahrt Dauern (Schritt b) . . . . .	146
6.5.3. Mikroskopische Kalibrierung auf die Haltedauerverteilung vor lichtsignal- gesteuerten Kreuzungen (Schritt c) . . . . .	148
6.5.4. Iterativer Ablauf . . . . .	150
6.5.5. Validierung und kritische Würdigung . . . . .	151

6.5.6.	Parametrierung des Energiemodells zur Berechnung des Fahrzeugenergiebedarfs . . . . .	153
6.6.	Parametrierung der Energieversorgungsinfrastruktur . . . . .	153
<b>7.</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>157</b>
7.1.	Ergebnisse der Standortoptimierung . . . . .	157
7.1.1.	Ladestellenoptimierung für den kollektiven Verkehr . . . . .	157
7.1.2.	Ladestellenoptimierung nach Einführung spezifischer Energiebedarfsklassen	161
7.1.3.	Sensitivitätsanalyse . . . . .	165
7.2.	Ergebnisvalidierung . . . . .	166
7.3.	Migration . . . . .	168
7.4.	Fazit . . . . .	170
<b>8.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>171</b>
8.1.	Zusammenfassung . . . . .	171
8.2.	Ausblick . . . . .	173
<b>Anhang</b>		<b>175</b>
<b>A.</b>	<b>Erstellung mikroskopischer Verkehrsszenarien mit SUMO</b>	<b>175</b>
A.1.	Definition von Infrastrukturkonstituenten . . . . .	175
A.1.1.	Definition von Knoten . . . . .	175
A.1.2.	Definition von Kanten . . . . .	175
A.1.3.	Definition zulässiger Fahrstreifenverbindungen an Knoten . . . . .	176
A.1.4.	Definition fahrstreifenspezifischer Parameter . . . . .	176
A.1.5.	Definition von Haltestellen . . . . .	176
A.1.6.	Definition von Lichtsignalanlagen . . . . .	177
A.1.7.	Definition von Ladestellen . . . . .	178
A.1.8.	Erstellung einer Netzdefinitionsdatei . . . . .	179
A.2.	Definition von Fahrzeugtypen . . . . .	179
A.3.	Definition von Verkehrsnachfrage . . . . .	180
A.3.1.	Manuelle Instanziierung von Fahrzeugen . . . . .	180
A.3.2.	Fahrzeuginstanziierung und Routenbildung mit DFROUTER . . . . .	181
A.3.3.	Fahrzeuginstanziierung und Routenbildung mit JTRROUTER . . . . .	181
A.4.	Kalibrierung von Verkehrsnachfrage . . . . .	182
A.4.1.	Kalibrierung von Fahrzeugrouten mit DUAROUTER . . . . .	182
A.4.2.	Kalibrierung disaggregierter Verkehrsnachfrage mit Hilfe von Verkehrszählungen mit cadyts . . . . .	183
A.5.	Erstellung einer SUMO Konfigurationsdatei . . . . .	183
A.6.	Simulationsausgabe des Energiemodells . . . . .	184
<b>B.</b>	<b>Erhobene Lichtsignalzeit- und -zustandspläne</b>	<b>185</b>
B.1.	Kreuzung Nordstraße/Bültenweg . . . . .	185
B.2.	Kreuzung Rebenring/Hagenring . . . . .	186

B.3. Kreuzung Gliesmaroder Straße/Hagenring (Referenz) . . . . .	186
B.4. Kreuzung Humboldtstraße/Hagenring . . . . .	187
B.5. Fußgängerüberweg Heinrichstraße/Hagenring . . . . .	187
B.6. Kreuzung Jasperallee/Hagenring . . . . .	188
B.7. Kreuzung Hans-Sommer-Straße/Langer Kamp . . . . .	188
B.8. Kreuzung Rebenring/Pockelsstraße . . . . .	189
B.9. Kreuzung Rebenring/Mittelweg . . . . .	189
B.10. Kreuzung Rebenring/Mühlenpfordtstraße . . . . .	190
B.11. Fußgängerüberweg Mühlenpfordtstraße/Wendenwehr . . . . .	190
B.12. Kreuzung Fallersleber Straße/Theaterwall . . . . .	191
B.13. Kreuzung Gliesmaroder Straße/Humboldtstraße . . . . .	191
<b>C. Schätzung der Abbiegewahrscheinlichkeiten an Kreuzungen</b>	<b>193</b>
<b>D. Fahrzeugenergiebilanzen nach erfolgter Ladestellenoptimierung im Referenzszenario</b>	<b>197</b>
D.1. Energiebilanzen nach Optimierung der Ladestellenanordnung für den kollektiven Verkehr . . . . .	198
D.2. Energiebilanzen nach Optimierung der Ladestellenanordnung für drei Energiebedarfsklassen . . . . .	199
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>219</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>223</b>

# Symbolverzeichnis

$a_n$	... Wunschbeschleunigung des Fahrers von Fahrzeug $n$
$A_{\text{FzgStirn}}$	... Stirnfläche eines Fahrzeugs
$A = [a_{i,j}]$	... Koeffizienten der Nebenbedingungen eines Optimierungsproblems
$A_{\text{adj}} = [e_{i,j,1}]$	... Adjazenzmatrix eines Digraphen
$\hat{b}$	... von Fahrer $n$ geschätzte max. Verzögerung von Fahrzeug $n - 1$
$b_n$	... Wunschverzögerung des Fahrers von Fahrzeug $n$
$\underline{b}$	... Grenzen der Nebenbedingungen eines Optimierungsproblems
$B = [\underline{b}_i]$	... Definition von (Bus-)Haltestellen
$c_j$	... Infrastrukturkandidat $j$ zur Positionierung einer Ladestelle
$c_{\text{roll}}$	... Rollwiderstandskoeffizient eines Fahrzeugs
$c_w$	... Luftwiderstandskoeffizient eines Fahrzeugs
$\underline{c}$	... Kostenvektor
$C = [\underline{c}_{i,j,k}]$	... Definition von Fahrstreifenverbindungen einer Verkehrswegeinfrastruktur
$\mathcal{C}$	... Menge potenzieller Infrastrukturkandidaten zur Positionierung einer Ladestelle
$d_n$	... Anzahl der Fahrten für ein Quelle-Ziel-Paar $n$
$D_n$	... Definition eines Ziels von Fahrer $n$
$\underline{e}(k)$	... Modellfehler
$E_{\text{bat}}$	... Energiegehalt einer Batterie
$E_{v_i}$	... Energiebedarf von Fahrzeug $v_i$
$\mathcal{E} = [e_{i,j,h}]$	... Definition von Kanten einer Verkehrswegeinfrastruktur
$f_q$	... Verkehrsfluss auf der Route eines Quelle-Ziel-Paars $q$
$\hat{f}$	... geschätzte Modellfunktion
$F$	... Kraft
$F = [f_{i,j}]$	... Quelle-Ziel-Matrix mit Anzahl der Fahrten $f_{i,j}$ von Quelle $i$ nach Ziel $j$
$F = [\underline{f}_{i,k}]$	... Definition von Fahrzeugflüssen

$g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	... Gravitationskonstante
$h, i, j, k$	... Zählvariablen bzw. Indizes
$\mathcal{H}$	... Menge aller Ladestellenkonfiguration
$J$	... Trägheitsmoment
$\mathcal{J} = [J_{i,j,k}]$	... Definition von Abbiegewahrscheinlichkeiten
$k_j$	... die Kundendienstanlage $j$
${}^iK_{f,j}$	... Folgekante $j$ des Knotens $i$
$\mathcal{K}$	... Menge aller Kundendienstanlagen
$L$	... Schallpegel
$m$	... Masse
$m$	... Anzahl der Nebenbedingungen (Länge des Vektors $\underline{b}$ )
$M$	... ein hinreichend großer Skalar
$n$	... Anzahl zu optimierender Entscheidungsvariablen (Länge des Vektors $\underline{x}$ )
$\mathcal{N}_q$	... Menge aller Knoten, die auf der Route eines Quelle-Ziel-Paars $q$ liegen
$O_n$	... Definition der Quelle von Fahrer $n$
$\mathcal{O} = [o_{i,k}]$	... Definition von Knoten einer Verkehrsweeinfrastuktur
$p$	... Anzahl zu platzierender Kundendienstanlagen
$p^+$	... Anteil der betrachteten Fahrzeuge mit positiver Energiebilanz
$P_{\text{Laden}}$	... Ladeleistung bei einer Energieübertragung
$\mathcal{P}_n$	... Menge möglicher Routen für die Quelle-Ziel-Paarung des Fahrers $n$
$q$	... Quelle-Ziel-Paar
${}^iq_j$	... Fahrzeugfluss in $\frac{\text{Fzge}}{\text{Zeit}}$ auf der Folgekante $j$ des Knotens $i$
$\mathcal{Q}$	... Menge aller Quelle-Ziel-Paare
$r$	... Kurvenradius
$r_c$	... Korrelationskoeffizient
$r_{v_i}$	... Trajektorie von Fahrzeug $v_i$
$R = [r_i]$	... Definition individueller Fahrstreifenparameter einer Verkehrsweeinfrastuktur
$s$	... Weg
$s_n$	... effektive Länge von Fahrzeug $n$ plus min. Folgeabstand

$t_n$	... Abfahrzeitpunkt von Fahrer $n$
$T$	... Zykluszeit
$T = [t_{v_i, c_j}]$	... Matrix mit potenziellen Ladedauern aller Fahrzeuge $v_i$ an allen Kandidaten $c_j$
$\mathcal{T} = [t_i]$	... Definition von Ladestellen
$\underline{u}(k)$	... Eingangsvektor eines Modells
$U$	... Ungleichheitskoeffizient nach Theil
$U_c$	... Kovarianzanteil des Ungleichheitskoeffizienten nach Theil
$U_m$	... Mittelwertanteil des Ungleichheitskoeffizienten nach Theil
$U_s$	... Varianzanteil des Ungleichheitskoeffizienten nach Theil
$v_{\text{Fzg}}(t)$	... Geschwindigkeit eines Fahrzeugs
$v_i$	... das Fahrzeug $i$
$V_n$	... Wunschgeschwindigkeit des Fahrers von Fahrzeug $n$
$V = [\underline{v}_i]$	... Definition von Fahrzeugtypen
$\mathcal{V}$	... Menge aller Fahrzeuginstanzen
$w_j$	... Kosten für der Errichtung einer Ladestelle am Infrastrukturkandidat $c_j$
$W$	... Arbeit
$x_{c_j}$	... binäre Variable gibt an, ob bei $c_j$ eine Ladestelle platziert werden soll
$\underline{x}$	... Ergebnis-/Entscheidungsvariablen eines Optimierungsproblems
$y_{v_i}$	... binäre Hilfsvariable gibt an, ob Fahrzeug $v_i$ einen Bonus $M$ erhält
$\bar{y}$	... arithmetischer Mittelwert eines Vektors $\underline{y}$
$\underline{y}(k)$	... Ausgangsvektor einer (Regel-)Strecke
$\hat{\underline{y}}(k)$	... Ausgangsvektor eines Modells
$\alpha$	... Schräglaufwinkel eines Reifens
$\beta$	... Schwimmwinkel eines Fahrzeugs
$\delta$	... Vorderradeinschlag eines Fahrzeugs
$\delta_n$	... Beschleunigungsexponent von Fahrer $n$
$\Delta E$	... Energiedifferenz
$\eta_{\text{Laden}}$	... Wirkungsgrad einer Energieübertragung
$\eta_{\text{rekup}}$	... Wirkungsgrad bei Rekuperation

$\eta_{\text{votr}}$	... Wirkungsgrad bei Vortrieb
$\hat{\underline{\theta}}$	... geschätzte Parameter eines Modells
$\lambda$	... Massenfaktor eines Fahrzeugs
$\lambda_n$	... Sensitivität des Fahrers von Fahrzeug $n$
$\rho_{\text{Luft}}$	... Dichte der Luft bei 20 °C auf Meeresspiegelhöhe
$\sigma_y$	... Standardabweichung eines Vektors $\underline{y}$
$\tau_n$	... Reaktionsdauer des Fahrers von Fahrzeug $n$
$\varphi$	... Steigungswinkel
$\psi$	... Gierwinkel eines Fahrzeugs



# 1 Einleitung und Motivation

Mobilität bildet heute einen Grundpfeiler unserer global vernetzten Gesellschaft. Seit der Industrialisierung und insbesondere seit Beginn der Serienproduktion von Automobilen unterliegt der Energiebedarf für den Verkehr einem stetigen Anstieg. Dies ist in erster Linie durch den rapiden Anstieg der Weltbevölkerung begründet. Darüber hinaus spielen jedoch auch soziale und technologische Faktoren eine wesentliche Rolle, dass in den vergangenen Jahrzehnten ein rapider Zuwachs der Wirtschaftsleistung aufstrebender Volkswirtschaften einhergehend mit einem weltweiten Anstieg der Urbanisierung verzeichnet wurde. Der globale Energiebedarf stieg im Zeitraum von 1973 bis 2012 kontinuierlich von 45.3 EJ<sup>(1)</sup> auf 105.0 EJ [IEA, 2014]. Im Jahr 2008 betrug der Energiebedarf im Verkehrssektor 26 % des globalen Energiebedarfs (74.1 EJ von global 285 EJ) und war für 25 % der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen (5.25 Gt von global 21 Gt) verantwortlich [IEA, 2008].

Heutiger Straßenverkehr ist durch einen hohen Anteil von Verkehrsmitteln geprägt, die mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden. Unter den insgesamt 3.2 Mio. im Jahr 2015 zugelassenen Personenkraftwagen in Deutschland [statista, 2016b] waren nur 12 363 (3.9 %) Elektrofahrzeuge [statista, 2016a]. Während ein großer Anteil dieser Elektrofahrzeuge derzeit den Zweck eines Statussymbols erfüllen (siehe [Drieschner, 2013; Kilimann, 2010]), ist der zunehmende Trend alternativer Antriebskonzepte ursprünglich ökologisch und ökonomisch motiviert. Zum einen haben Verbrennungsmotoren wesentlich geringere Wirkungsgrade als Elektromotoren und werden mit fossilen Brennstoffen betrieben, deren Verbrennung wiederum die Bildung von Schadstoffen zur Folge hat und für die globale Erwärmung sowie den damit einhergehenden Umweltproblemen verantwortlich gemacht werden. Zum anderen stieg mit der Nachfrage auch der Preis von Rohöl. Trotz regelmäßiger Schwankungen ist davon auszugehen, dass mit knapper werdenden Reserven bei gleichzeitig steigender Nachfrage die Preise für Rohöl auch künftig steigen werden.

Die Abkehr von fossilen Energieträgern wird von vielen als Kernbestandteil der sich aktuell in Deutschland vollziehenden Energiewende gesehen (siehe [Armaroli und Balzani, 2011; Scheer, 2010]), spielt jedoch auch in anderen Ländern eine große Rolle [Sills, 2011]. Der gleichzeitige infrastrukturelle Ausbau zur vermehrten Nutzung regenerativer Energieträger, wie bspw. Solar-, Wind- oder Bioenergie, bildet dabei eine Grundvoraussetzung für nachhaltige Mobilitätslösungen. Der Betrieb von Verkehrsmitteln mit alternativen Antriebskonzepten wird mit höherer Marktdurchdringung aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten zunehmend lukrativer, da regenerative oder erneuerbare Energiequellen bezogen auf den menschlichen Zeithorizont unerschöpflich verfügbar sind und sich im Vergleich zum fossilen Energieträger Rohöl in sehr kurzer Dauer erneuern [Quaschnig, 2013]. Für eine zuverlässige Energieversorgung entsprechender Verkehrsmittel mangelt es bislang jedoch an einer flächendeckenden Versorgungsinfrastruktur.

Bei der globalen Entwicklung der urbanen Mobilität ergeben sich Herausforderungen, die sich bereits heute in schnell gewachsenen Metropolen abzeichnen und für die Lösungen gefunden

---

<sup>(1)</sup>1 EJ = 10<sup>3</sup> PJ = 10<sup>6</sup> TJ = 10<sup>9</sup> GJ = 10<sup>12</sup> MJ = 10<sup>15</sup> kJ = 10<sup>18</sup> J = 2.778 · 10<sup>11</sup> kWh

werden müssen. Dazu zählen folgende Punkte:

1. Mit dem prognostizierten Anstieg der Weltbevölkerung wird insb. in den Entwicklungsländern und Schwellenländern Asiens und Afrikas der Mobilitätsbedarf deutlich zunehmen [United Nations, 2012].
2. Neben der Bevölkerungsentwicklung wird in den meisten Regionen der Welt auch ein erheblicher Anstieg der Urbanisierung erwartet (mit Ausnahme von Europa, wo die Urbanisierung bei einem Grad von 74.6 % weitestgehend gesättigt ist) [statista, 2014; United Nations, 2014]. Der Straßenverkehr wird sich zunehmend in Ballungsräumen konzentrieren und wird besonders dort die bedarfsgerechte Entwicklung von Mobilitätsangeboten erfordern.
3. Mit der Abkehr von fossilen Energieträgern im Verkehrssektor muss eine alternative Energieversorgungsinfrastruktur auf vorherrschende Verkehrssituationen optimiert ausgelegt und in Betrieb genommen werden. Diese Migration äußert sich bereits heute in der Verteilung und Inbetriebnahme von Ladesäulen für Elektrofahrzeuge. Die zunehmende Elektrifizierung des Straßenverkehrs erfordert dabei einen weiteren Infrastrukturausbau, um die zusätzlich erforderliche Energie sowohl zu erzeugen als auch über das elektrische Energienetz bereitzustellen. Der Anteil des deutschen Endenergiebedarfs für den Verkehr betrug im Jahr 2013 mit 2612 PJ 28.3 % [BMVI, 2014]. Die Aufteilung des Energiebedarfs auf die einzelnen Verkehrsarten ist in Tabelle 1.1 dargestellt. In 2013 wurden 80.4 % der deutschen Verkehrsleistung in Höhe von 1141.1 Mrd. Personenkilometer (Pkm) vom motorisierten Individualverkehr erbracht [BMVI, 2014] (siehe Tabelle 1.1). Bei einer brutto erzeugten elektrischen Energie von 2210.4 PJ in 2014 [BDEW, 2015], hätte die Versorgung des Personenverkehrs auf Straßen mit elektrischer Energie (1485 PJ in 2013 [BMVI, 2014]) einen Anteil von 65.1 % zusätzlich zu erzeugender elektrischer Energie zur Folge. Das Energieziel der Bundesregierung, bis 2050 elektrische Energie vollständig aus erneuerbaren Energiequellen zu erzeugen, war bereits im Jahr 2014 zu 27.8 % erfüllt [BMW, 2015].

Die Betrachtung des Mobilitätsverhaltens in Deutschland zeigt, dass sich der optimierte Ausbau einer Energieversorgungsinfrastruktur für den Straßenverkehr insb. auf städtische Bereiche konzentrieren muss. Die Verkehrsleistung setzt sich aus Fahrten mit einer durchschnittlichen Länge von 11.5 km zusammen, wobei nur 24.1 % dieser Fahrten in ländlichen Gebieten zurückgelegt werden [Follmer et al., 2010]. Der deutsche Urbanisierungsgrad beträgt 75.1 % [statista, 2014].

In Tabelle 1.1 wird verdeutlicht, dass bei der erforderlichen Fokussierung auf den städtischen Verkehr die Optimierung des straßengebundenen Personenverkehrs von zentraler Bedeutung ist. Dessen Energiebedarf macht mit 56.9 % einen erheblichen Anteil der gesamten für den Verkehr erforderlichen Energie aus. Der öffentliche Verkehr erforderte in 2013 nur 2.2 % des gesamten Energiebedarfs im straßengebundenen Personenverkehr, erbrachte jedoch aufgrund deutlich höherer Besetzungsgrade mit 78.1 Mrd. Pkm 7.8 % der Straßenverkehrsleistung [BMVI, 2014]. Beide Verkehrsarten bieten unter den Prämissen der Urbanisierungs- und Weltbevölkerungsentwicklung sowie der angestrebten und (spätestens mit dem Versiegen fossiler Erdölreserven) bevorstehenden Umstellung des Verkehrs auf alternative Versorgungskonzepte enorme Optimierungspotenziale. Darüber hinaus leistet der Einsatz alternativer Antriebskonzepte im ÖPNV einen großen

Tabelle 1.1.: Endenergiebedarf in Deutschland nach Wirtschafts- und Verkehrsbereich (links) sowie erbrachte Verkehrsleistungen in Deutschland nach Verkehrsbereich (rechts) im Jahr 2013 [BMVI, 2014]

Wirtschafts- und Verkehrsbereich	Endenergiebedarf in PJ	Verkehrsbereich	Verkehrsleistung in Mrd. Pkm
Insgesamt	9242	Verkehr Insgesamt	1141.1
Industrie	2614	Schienenverkehr	89.0
Haushalte, Gewerbe	4016	Schienennahverkehr	52.2
Verkehr	2612	Schienenfernverkehr	36.8
Schienenverkehr	57	Öff. Straßenpersonenverk.	78.1
Straßenverkehr	2168	Linienverkehr	57.9
Personenverkehr	1485	Linienahverkehr	55.2
Individualverkehr	1452	Gelegenheitsverkehr	20.2
Öffentl. Verkehr	33	Luftverkehr	56.3
Güterverkehr	683	Motoris. Individualverk.	917.7
Luftverkehr	375	Öffentlicher Verkehr	223.4
Binnenschifffahrt	12	Öffentl. Personennahverk.	108.1

Beitrag im städtischen Verkehr zur verringerten Emission von Schall und Luftschadstoffen, insb. Schweb-/Feinstaub, Stickoxide sowie Kohlenstoffdioxid. Aufgrund ihrer umwelt- und gesundheitsschädigenden Wirkung wurden für die meisten dieser Emittenten Belastungsgrenzwerte eingeführt, deren Einhaltung in Ballungs- und Siedlungsgebieten strikt reglementiert wird [Ehrenstein, 2013]. In diesem Zusammenhang stellt die Ablösung von mit Diesel betriebenen Fahrzeugen im ÖPNV ein großes Potenzial zur Verbesserung der Luftqualität in Großstädten dar [Müller-Hellmann, 2013]. Die dafür erforderlichen Investitionen stellen jedoch die Kommunen vor große Herausforderungen.

In dieser Arbeit wird die Einführung rein *batterieelektrischer Fahrzeuge* im urbanen Straßenverkehr untersucht. Für die Optimierung des städtischen Verkehrsbetriebs werden Maßnahmen für die Ermittlung einer optimalen Anordnung einzelner Ladepunkte einer zugehörigen *induktiven Energieversorgungsinfrastruktur* erarbeitet.

## 1.1. Energieübertragung im Straßenverkehr

Mit der jahrzehntelangen Gewohnheit, Benzin und Diesel als Kraftstoff für die Mobilität im Bodenverkehr zu nutzen, hat sich ein Paradigma des verbrennungsmotorischen Verkehrsbetriebs geprägt: aufgrund der hohen Energiedichte der Kraftstoffe müssen Nutzer bezogen auf die Fahrtdauer nur eine verhältnismäßig kurze Betriebsunterbrechung für die Kraftstoffübertragung in Kauf nehmen. Das Tanken erfolgt in langen Intervallen und mit enorm hohen Leistungen von bis zu 51.6 GW<sup>(2)</sup>. Hohe Fahrzeugreichweiten führten wiederum dazu, dass die Anordnung der Energieversorgungsinfrastruktur nicht optimiert werden musste, da selbst Fahrzeuge mit (bezogen auf die maximal mögliche Reichweite) verhältnismäßig geringen Restreichweiten noch sehr wahrscheinlich eine Tankstelle erreichen können, bevor deren Kraftstoffvorrat erschöpft ist.

<sup>(2)</sup>Bei einer Dieselförderrate an Zapfsäulen von 80 l/min und einer spezifischen Energie (Energiedichte) des Dieselskraftstoffs von 45.4 MJ/kg ergibt sich eine Energieübertragungsrate von 51.6 GW

Der Energieversorgung mit fossilen Kraftstoffen steht der über Oberleitungen versorgte Verkehrsbetrieb gegenüber, bei dem elektrisch betriebene Verkehrsmittel aus einem elektrischen Netz kontinuierlich mit der erforderlichen Energie versorgt werden. Mit der Dezentralisierung der Energieversorgungsinfrastruktur zeichnen sich die darüber versorgten Fahrzeuge klassischerweise dadurch aus, dass sie keinen Energiespeicher mitführen. Die für den Betrieb erforderliche Energie wird über die permanente Anbindung an die Oberleitungen bereitgestellt. Die Gegenüberstellung dieser zwei Extremfälle zeigt, dass die Energieübertragung im Verkehrsbetrieb mit drei Parametern charakterisiert werden kann: der Energieträgerübertragungsrate und der Energiespeichermenge (die kombiniert in einer von der Nutzung abhängigen erforderlichen Ladedauer resultieren) sowie einer vom Nutzer tolerierten Ladedauer. Aus diesen Faktoren ergibt sich die erforderliche Dichte der entsprechenden Energieversorgungsinfrastruktur.

In dieser Hinsicht hat sich bei der bisherigen Elektrifizierung des motorisierten individuellen sowie des öffentlichen Straßenverkehrs trotz neuer technologischer Möglichkeiten weiterhin das Energieversorgungsparadigma des verbrennungsmotorischen Verkehrsbetriebs etabliert: der Fahrbetrieb muss (wie beim Tanken an Tankstelle) für die Dauer der Energieträgerübertragung unterbrochen werden. Die Ermittlung optimaler Ladestellenstandorte erfolgt unter Berücksichtigung relevanter Kriterien, wie bspw. Verkehrsnachfrage, Siedlungsstruktur sowie bestehender Infrastruktur. Bei der Ermittlung optimaler Standorte kann jedoch in Großstädten aufgrund der vorherrschenden Bebauung oft nur eine ähnliche Strategie verfolgt werden, wie anfänglich bei der Standortermittlung für Tankstellen. Es wird eine erforderliche Anzahl von Ladestellen an *zentralen* Knotenpunkten bestimmt, an denen ausreichend Platz zum Abstellen von Elektrofahrzeugen vorhanden ist, während deren Batterien über eine Dauer von mind. 20 Minuten (bis hin zu 8 Stunden) geladen werden. Diese Betriebsunterbrechung wird zusätzlich dadurch begünstigt, dass sich konduktive Lösungen durchgesetzt haben, die das Anbringen der entsprechenden Ladekabel durch die Benutzer erfordern. An 44 % der öffentlich zugänglichen Ladestellen erfolgt die Energieübertragung mit einer Ladeleistung bis zu 11 kW und nur bei 7 % mit einer Ladeleistung über 22 kW [Weemaes, 2016]. Zudem steht in Anbetracht der geringeren Fahrzeugreichweiten (trotz der durchschnittlich kurzen Weglängen von 11,5 km [Follmer et al., 2010]) oft der zuverlässige *Langstreckenbetrieb* von Verkehrsmitteln im Fokus der Ladestellenoptimierung. Ein Beispiel hierfür liefert das Projekt SLAM<sup>(3)</sup> [ika, RWTH Aachen, 2015], welches den Aufbau eines Forschungs-Schnellladenetzes mit 600 DC-Schnellladestellen beinhaltet und sich vordergründig der Herausforderungen der geringen Reichweiten widmet. Es gibt jedoch zahlreiche Gegenbeispiele, in denen sich der Optimierung des städtischen Personennahverkehrs gewidmet wird. Folgende Vorhaben zeigen das Optimierungspotenzial, welches sich beim Einsatz alternativer Antriebs- und Versorgungskonzepte durch die Hybridisierung der zwei klassischen Energieversorgungskonzepte und die gleichzeitige Integration der Energieübertragung in den Verkehrsbetrieb erzielen lässt:

#### **Batteriebetriebene Straßenbahn in Sevilla, Spanien**

Mit dem Einsatz von Straßenbahnen mit Batteriespeichern konnten im Bereich der Innenstadt Abschnitte des Oberleitungsnetzes zurückgebaut werden, um das Stadtbild

---

<sup>(3)</sup>Das Projekt SLAM (Schnellladenetz für Achsen und Metropolen) wird gefördert vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

aufzuwerten. Die Zentralisierung der Versorgungsinfrastruktur und Einführung von Energiespeichern in Verkehrsmitteln erfordern jedoch größere Übertragungsleistungen, weil bei einem Kontakt zwischen Stromabnehmer und Fahrdrat nicht nur die erforderliche Traktionsleistung abgenommen sondern auch die Batterie geladen werden muss.

### **Induktiv geladene Elektrobusse in Braunschweig, Deutschland**

Im öffentlichen Verkehrsbetrieb der Stadt Braunschweig wurde eine hochfrequentierte Buslinie im Rahmen der Verbundprojekte *emil* und *InduktivLaden*<sup>(4)</sup> vollständig elektrifiziert. Die erforderliche Energie wird mittels des Transformatorprinzips über eine Versorgungsinfrastruktur an Haltestellen und während der Wendezeiten mit Ladeleistungen von über 200 kW bereitgestellt. Durch die (für elektromobile Anwendungen sehr) hohe Ladeleistung in Kombination mit kurzen Intervallen zwischen Ladungen sinkt die Größe des erforderlichen Energiespeichers.

Die Forschungsergebnisse der Projekte *emil* und *InduktivLaden* zeigen, dass mit einer dezentralisierten Energieversorgungsinfrastruktur und mit Ladeleistungen ab etwa 100 kW (pro Verkehrsmittel und Ladevorgang) der gesamte städtische Straßenverkehr vollständig während seines Betriebs (bspw. bei Halten vor Lichtsignalanlagen) mit der erforderlichen Energie versorgt werden könnte [Kurzveil, 2015]. Voraussetzung hierfür ist eine Minimierung der Dauer zwischen Ankunft eines Fahrzeugs an einer Ladestelle bis zum Beginn der Energieübertragung. Aufgrund der Einleitung eines Ladevorgangs durch Fahrzeugidentifikation, -autorisierung etc. beträgt diese derzeit bis zu 10 Sekunden, könnte jedoch durch gezielte Automatisierungsmaßnahmen deutlich reduziert werden. Zusätzlicher Vorteil dabei wäre, dass kein Mitwirken der Fahrer bei Energieübertragungen erforderlich ist und diese sich gänzlich auf die Aufgaben der Fahrzeugführung und des Verkehrsbetriebs konzentrieren können.

Im Bereich des öffentlichen Personenverkehrs bietet der Einsatz von Elektrofahrzeugen enorme Potenziale zur Verbesserung der Luft-, Verkehrs- und Lebensqualität in Großstädten [Müller-Hellmann, 2013]. Der Einsatz rein batteriebetriebener Elektrofahrzeuge stellt jedoch die Verkehrsbetreiber vor große Herausforderungen. Neben des hohen Energiebedarfs entsprechender Verkehrsmittel, der geringen spezifischen Energiedichte verfügbarer Energiespeicher und der folglich kurzen Fahrzeugreichweiten spricht auch die im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen geringe Ladeleistung gegen deren Einsatz im Linienbetrieb. Desweiteren kennzeichnet sich der öffentliche Verkehr durch hohe Fahrzeugnutzungsverhältnisse und folglich geringe Fahrzeugstandzeiten aus. Mit der Anwendung der induktiven Energieübertragung und der hohen Ladeleistung eröffnet sich Betreibern jedoch die Möglichkeit, batteriebetriebene Elektrofahrzeuge einzusetzen. Im folgenden Abschnitt werden die Braunschweiger Projekte *emil* und *InduktivLaden* zusammengefasst, in denen die induktive Energieübertragung mit hoher Leistung im öffentlichen Linien- sowie Individualverkehr zur Anwendung kommt.

## **1.2. Die Braunschweiger Projekte *emil* und *InduktivLaden***

Motiviert durch das Ziel, eine Million Elektrofahrzeuge bis zum Jahr 2020 auf deutsche Straßen zu bringen, wurden in den vergangenen Jahren eine Vielzahl entsprechender Projekte

<sup>(4)</sup>Die Projekte *emil* (Elektromobilität mittels induktiver Ladung) und *InduktivLaden* (Induktives Laden für Bus und Taxi) werden gefördert vom deutschen Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.



von der Bundesregierung gefördert. Diese sollen Mobilitätskonzepte erarbeiten, die dafür notwendigen Entwicklungen vorantreiben und erproben sowie deren Wirtschaftlichkeit bewerten. Zwei dieser sind die Braunschweiger Projekte *emil* und *InduktivLaden*, die im Rahmen der bundesweiten Förderinitiative *Schaufenster Elektromobilität* gefördert werden [Dietrich et al., 2016; Meins und Graffam, 2011; Meins et al., 2014]. Kernbestandteil beider Projekte ist die induktive Energieübertragung mittels des Transformatorprinzips.

Die Energie wird über eine Primärspule bereitgestellt, die an ermittelten Standorten in die Verkehrswege eingelassen ist und für eine Energieübertragung mit Wechselstrom betrieben wird. Für die Energieabnahme sind kompatible Verkehrsmittel mit einer am Unterboden montierten Sekundärspule ausgerüstet. Der primärseitige Wechselstrombetrieb induziert eine Spannung in die Sekundärspule. Der resultierende Strom kann nach einer Gleichrichtung in eine Traktionsbatterie geladen werden. Eine Bestromung der Primärspule mit Frequenzen von über 20 kHz ermöglicht dabei Übertragungsleistungen von über 200 kW, die wiederum über den Netzanschluss bereitgestellt werden müssen. Je nach Luftspalt zwischen den beiden Spulen sind in automobilen Anwendungen Wirkungsgrade von  $\eta > 0.9$  realisierbar. Neben der stationären Ladung (d.h. Verkehrsmittel stehen während des Ladens an einer Ladestelle) erlaubt die berührungslose induktive Energieübertragung auch dynamische Anwendungen, um Verkehrsmittel während der Fahrt mit Energie zu versorgen. Hierfür kann die Primärspule (die aus mehreren Teilspulen zusammengesetzt ist) über längere Segmente zu einem sog. *Ladefahstreifen* angeordnet werden. Um unzulässige Magnetfeldstärken dort zu vermeiden, wo Personen dieser ausgesetzt sein können, muss eine Positionserfassung gewährleisten, dass nur diejenigen Spulen bestromt werden, die sich unter einem zu versorgenden Fahrzeug befinden. Gesetzliche Vorgaben orientieren sich dabei an den in [ICNIRP, 1998] publizierten Richtwerten. Eine weitere Sicherheitsbetrachtung ist für metallische und magnetische Fremdkörper im Luftspalt erforderlich, die sich während einer Ladung erhitzen können und somit eine Gefährdung für Personen darstellen.

Neben der Inbetriebnahme der ersten induktiven Ladestelle im öffentlichen Raum Deutschlands sowie des ersten kompatiblen Elektrobusses für den öffentlichen Personenverkehr, stehen die Langzeiterprobung und die wirtschaftliche Bewertung im Vordergrund des Projekts *emil*. Im Folgeprojekt *InduktivLaden* wird der Dieselmotor einer gesamten Buslinie vollständig durch eine elektrische Gelenkbusflotte abgelöst. Zur größtmöglichen öffentlichen Wahrnehmung wurde hierfür die hochfrequentierte Ringlinie M19 ausgewählt, die mit einer Linienlänge von 11.7 km täglich etwa 6 000 Fahrgäste zwischen zentralen Knotenpunkten befördert und dabei 27 Haltestellen bedient. Darüber hinaus werden drei elektrische Personenkraftwagen mit neu entwickelten Komponenten umgerüstet, damit diese die eingerichtete induktive Ladeinfrastruktur gemeinsam mit den induktiven Elektrobussen des öffentlichen Verkehrs nutzen können. Kurz nach Inbetriebnahme der ersten induktiven Ladestelle am Braunschweiger Hauptbahnhof hat der erste induktive Elektrobus im März 2014 den Linienbetrieb aufgenommen. Noch im gleichen Jahr folgte sowohl der weitere infrastrukturelle Ausbau für die Energieversorgung, sowie die Inbetriebnahme des ersten Gelenkbusses im Dezember 2014. Bis Projektabschluss sollen neben den fünf bereits bestehenden Ladestellen (eine davon im Busdepot) zwei weitere entlang des Linienwegs der M19 errichtet sowie für die verlässliche Personenbeförderung zusätzliche elektrische Gelenkbusse in den Linienbetrieb eingegliedert werden. Aufgrund des ringförmigen Linienwegs der M19 sind End- und Starthaltestelle identisch (Haltestelle Hauptbahnhof), so dass die Notwendigkeit einer



Abbildung 1.1.: Elektrofahrzeuge aus den Braunschweiger Projekten *emil* und *InduktivLaden*: Ein Elektrobuss des Projekts *emil* lädt induktiv an einer der beiden Ladestellen am Braunschweiger Hauptbahnhof (links). Ein im Projekt *InduktivLaden* umgerüsteter Elektro-PKW lädt induktiv in der Versuchshalle des Niedersächsischen Forschungszentrums für Fahrzeugtechnik (rechts).

Energiebereitstellung an zwei räumlich getrennten Endhaltestellen entfällt. Die Energieversorgung der Busse erfolgt während der Fahrzeugwende und Ruhezeit am Hauptbahnhof sowie der Umstiegszeit an ausgewählten Haltestellen.

In den Projekten *emil* und *InduktivLaden* zeigte sich, dass ein wirtschaftlicher öffentlicher Verkehrsbetrieb mit Elektrobussen möglich ist, wenn eine Energieübertragung mit hohen Leistungen gewährleistet und in den Verkehrsbetrieb integriert werden kann. Da die vollständige wirtschaftliche Bewertung jedoch die Berücksichtigung der Fahrzeug- bzw. Komponentenlebensdauern erfordert, ist eine abschließende Bewertung erst nach längeren Nutzungsdauern möglich. Des Weiteren hängt diese Bewertung von der Marktdurchdringung der Technologie sowie der preislichen Entwicklung der verbauten Komponenten ab. Dem Braunschweiger Beispiel folgend, werden inzwischen auch in den Städten Berlin, Mannheim und Brügge (Belgien) Dieselbusse des öffentlichen Personenverkehrs sukzessive im Rahmen öffentlich geförderter Projekte von induktiv geladenen Elektrobussen abgelöst.

### 1.3. Motivation

Mit abnehmenden fossilen Energiereserven wird die Nutzung alternativer Energieträger für den Verkehr zunehmend lukrativer und auf lange Sicht die heutige Energieversorgungsinfrastruktur ablösen, die überwiegend aus Tankstellen zum *Nachladen* von Benzin- und Dieselmotorkraftstoff besteht. Mit der Inbetriebnahme und Nutzung einer verteilten Energieversorgungsinfrastruktur für den Verkehr könnte die Reichweite als ausschlaggebendes Kriterium das derzeit gegen den Kauf von Elektrofahrzeugen spricht und die damit einhergehende Kaufhemmnis ausgeräumt werden. Die aktuellen Entwicklungen bei Energiespeichertechnologien lassen auf einen langen Zeithorizont schließen, bis mit Rohöl vergleichbare Energiedichten realisiert werden können [Chen und Shaw, 2014]. Statt dieses Reichweitenproblem fahrzeugseitig mit neuen bzw. optimierten Speichertechnologien zu lösen, kann mit verfügbaren Energieübertragungstechnologien eine *infrastrukturseitige Lösung* angestrebt werden. Mit Ausbau und Inbetriebnahme einer Ladeinfrastruktur, die unserer Gesellschaft mit knapper werdenden fossilen Energieressourcen ohnehin bevorsteht,

können durch deren optimierter Anordnung kompatible Verkehrsmittel mit höher frequentierten Zwischenladungen als bisher weiterhin zuverlässig ihre Ziele erreichen. Infrastrukturelle Maßnahmen setzen zwar große Investitionen voraus, stellen jedoch langfristige und langlebige Lösungen dar. Beispiele hierfür sind neben dem Schienen- und Straßennetz auch Oberleitungen, die in vielen Großstädten sowohl Tram als auch Teile des öffentlichen Busverkehrs seit über 75 Jahren mit Energie versorgen.

## 1.4. Zielsetzung und konzeptioneller Ansatz

In dieser Arbeit wird das Ziel verfolgt, mit einer infrastrukturellen Optimierung die zuverlässige Versorgung des Verkehrs mit der notwendigen Energie zu gewährleisten, indem der Verkehr in einem Untersuchungsraum betrachtet wird und die darin berücksichtigten Verkehrsmittel eine durchschnittlich positive Energiebilanz aufweisen. Es soll gezeigt werden, dass durch die Anwendung der induktiven Energieübertragung Fahrzeuge im urbanen Straßenverkehr während ihres Verkehrsbetriebs mit Energie versorgt werden können, ohne dass ein zusätzlicher (Um-)Weg zur nächsten Ladestelle und ein längerer Aufenthalt geplant werden muss.

Aufgrund der derzeit mangelnden Datenlage über die großflächige Nutzung von Elektrofahrzeugen bietet sich eine Betrachtung auf Grundlage von Verkehrssimulationen an. Diese ermöglichen Verkehrsbetrieben sowie Städte-, Verkehrs- und Infrastrukturplanern eine kostengünstige Alternative zu umfangreichen Messkampagnen, um vorherrschende Verkehrsbedingungen zu untersuchen. Des Weiteren ermöglichen sie die Analyse künftiger Szenarien, um eine entsprechende Energieversorgungsinfrastruktur nachhaltig zu planen und zielgerichtet in Betrieb zu nehmen. Mit dieser Arbeit wird diesen potenziellen Anwendern neben den theoretischen Grundlagen ein Leitfaden über die notwendigen Schritte und ein Softwarewerkzeug bereitgestellt, um die erforderlichen Analysen des Verkehrs und die Optimierung der Ladestellenstandorte durchführen zu können.

Es wird darüber hinaus der erforderliche infrastrukturelle Ausbau unter Berücksichtigung realitätsnaher Verkehrsszenarien untersucht, um Anforderungen an das elektrische Versorgungsnetz abzuleiten. Eine anschließende Validierung der Optimierungsergebnisse kann auf Grundlage von erhobenen Fahrzeugpositionen aus dem realen Verkehrsbetrieb erfolgen. Hierfür steht eine umfangreiche Datenbasis von aufgezeichneten Trajektorien verschiedener Fahrzeuge des Braunschweiger öffentlichen Personennahverkehrs sowie des motorisierten Individualverkehrs zur Verfügung.

Da die vollständige Erfassung des realen Verkehrs mit allen Fahrzeugen und ihren Routen nicht realisierbar ist, wird eine Untersuchung auf Basis von rechnergestützten Verkehrssimulationen durchgeführt. Um die erforderliche Rechenleistung zu senken sowie die Verteilung der bereitgestellten Energie auf vorhandene Anschlusspunkte zu ermöglichen, ist die Unterteilung eines vollständigen Stadtgebietes in kleinere Untersuchungsräume notwendig. In Abbildung 1.2 ist als Beispiel das Braunschweiger Stadtgebiet mit Hervorhebung eines Untersuchungsraums dargestellt. In jedem dieser Untersuchungsräume muss Verkehrsmitteln im Mittel mindestens die Energie zugeführt werden, die für ihre Routen im Untersuchungsraum erforderlich sind. Die Summe dieser lokalen Optima (der einzelnen Segmente) ist eine mögliche Realisierung des globalen Optimierungsziels, den Verkehr in einer gesamten Stadt mit der notwendigen Energie zu versorgen.



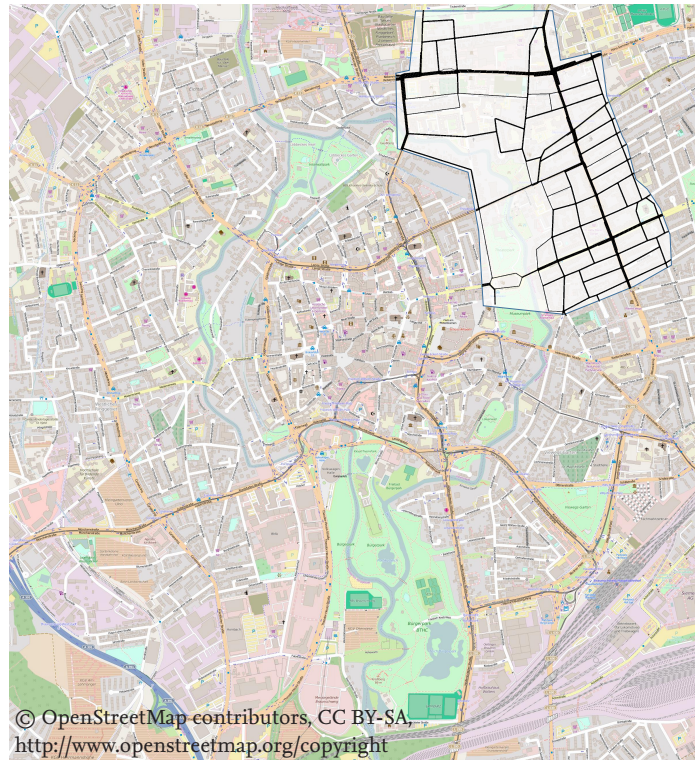


Abbildung 1.2.: Braunschweiger Stadtgebiet mit Hervorhebung eines beispielhaften Untersuchungsraums

## 1.5. Struktur der Arbeit

Nach diesem einführenden Kapitel 1 widmen sich Kapitel 2 bis 5 den theoretischen Grundlagen und jeweiligen Anforderungen dieses interdisziplinären Verfahrens zur Optimierung der Ladestellenanordnung, während in Kapitel 6 ein beispielhafter Untersuchungsraum modelliert und analysiert wird. In Kapitel 7 werden anschließend die Optimierungsergebnisse der Ladestellenpositionierung präsentiert. In Abbildung 1.3 wird eine detaillierte, grafische Übersicht über die Struktur dieser Arbeit gegeben.

In Kapitel 2 werden eine Auswahl von Modellen und Methoden vorgestellt sowie verfügbare Softwarewerkzeuge gegenübergestellt, mit denen der Verkehr in einem Untersuchungsraum realitätsgetreu nachgebildet werden kann. Für die Erstellung zu simulierender Verkehrsszenarien können verfügbare Informationen (bspw. aus Geo-Informationen-Systemen über die Verkehrsinfrastruktur) und Messdaten (bspw. über die Verkehrsbelastung) genutzt sowie Verkehrsmittel mit individuellen Verhaltensmodellen, Modellparametern und Routen in der Verkehrsinfrastruktur instanziiert werden. Für die anschließende Verkehrssimulation stehen eine Vielzahl von Softwarewerkzeugen zur Verfügung, denen verschiedene Modellstrukturen und (Verhaltens-)Modelle mit spezifischen Entscheidungsheuristiken zugrunde liegen. Der resultierende Verkehr repräsentiert ein Gleichgewicht zwischen dem Verkehrsangebot und der bestehenden Verkehrsnachfrage und wird für die nachfolgenden Analyse- und Optimierungszwecke verwendet.

In Kapitel 3 werden die Grundlagen der Modell- und Routenkalibrierung zur Validierung

von Verkehrsszenarien vorgestellt, um die Realitätstreue von simulierten Verkehrsszenarien durch Optimierungen und einen Abgleich mit verfügbaren Verkehrsmessdaten erheblich zu steigern. Dazu werden die resultierenden Fahrzeugtrajektorien aggregiert oder individuell mit verfügbaren Messdaten verglichen, um gezielt Einfluss auf die Objektinstanzen simulierter Verkehrsmittel zu nehmen und dabei die Parameter ihrer Fahrverhaltensmodelle und gewählten Routen zu adaptieren. Anschließend werden Anforderungen an die Kalibrierung und Validierung von Verkehrsszenarien formuliert, um mit diesen die optimierte Anordnung einer Energieversorgungsinfrastruktur zu ermöglichen.

In Kapitel 4 werden Emissions- und Energiebedarfsmodelle vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf den Grundlagen eines Energiemodells sowie einer für Verkehrssimulationen nutzbaren Implementierung. Die benötigte Energiemenge ergibt sich auf Grundlage von kinematischen und dynamischen Modellen, die eine Berechnung des Energiebedarfs unter Nutzung von Fahrzeugtrajektorien und individuellen Fahrzeugparametern ermöglichen. Der individuelle sowie auch der über mehrere Fahrzeuge aggregierte Energiebedarf entscheidet maßgeblich über die optimierte Anordnung einer Energieversorgungsinfrastruktur.

In Kapitel 5 ist eine Übersicht bestehender Vorarbeiten gegeben, die eine optimierte Positionierung von induktiven Ladestellen erlauben. Darauf aufbauend werden notwendige Erweiterungen vorgestellt, die zusätzliche Aspekte, wie bspw. positionsabhängige Fahrzeugaufenthaltsdauern, berücksichtigen und ebenfalls aus den Fahrzeugtrajektorien ermittelt werden können. Bei dem entwickelten Ansatz kommt die lineare Programmierung zur Anwendung, deren Resultat eine optimierte Anordnung der Energieversorgungsinfrastruktur ist.

Anschließend wird in Kapitel 6 unter Nutzung der in den Kapiteln 2 bis 5 eingeführten Grundlagen das vorgestellte Verfahren zur optimierten Anordnung der induktiven Energieversorgungsinfrastruktur in einem realen Verkehrssystem angewendet. Es wird dabei der Straßenverkehr im Braunschweiger Untersuchungsraum betrachtet (siehe Abbildung 1.2) und mikroskopisch simuliert. Es werden der Aufbau des Referenzszenarios in diesem beispielhaften Untersuchungsraum sowie die dafür verwendeten Daten, Messwerte, Annahmen und Systemparameter beschrieben.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse der Optimierung unter Berücksichtigung verschiedener Parametervariationen aufgezeigt, die eine Betrachtung unterschiedlicher Zukunftsszenarien ermöglichen. Dazu gehören Untersuchungen zu Skalierungseffekten während der Marktanlaufphase und zur gemeinsamen Nutzung der eingerichteten Energieversorgungsinfrastruktur durch Fahrzeuge und Fahrzeugflotten verschiedener Verkehrsarten. Darüber hinaus werden Anforderungen an künftige Energieversorgungsinfrastrukturen in Abhängigkeit von Systemparametern formuliert, wie bspw. der Übertragungsleistung oder der Anzahl erforderlicher Versorgungspunkte sowie Herausforderungen bei der Migration hervorgehoben.

Es folgt abschließend eine Zusammenfassung und der Ausblick in Kapitel 8.

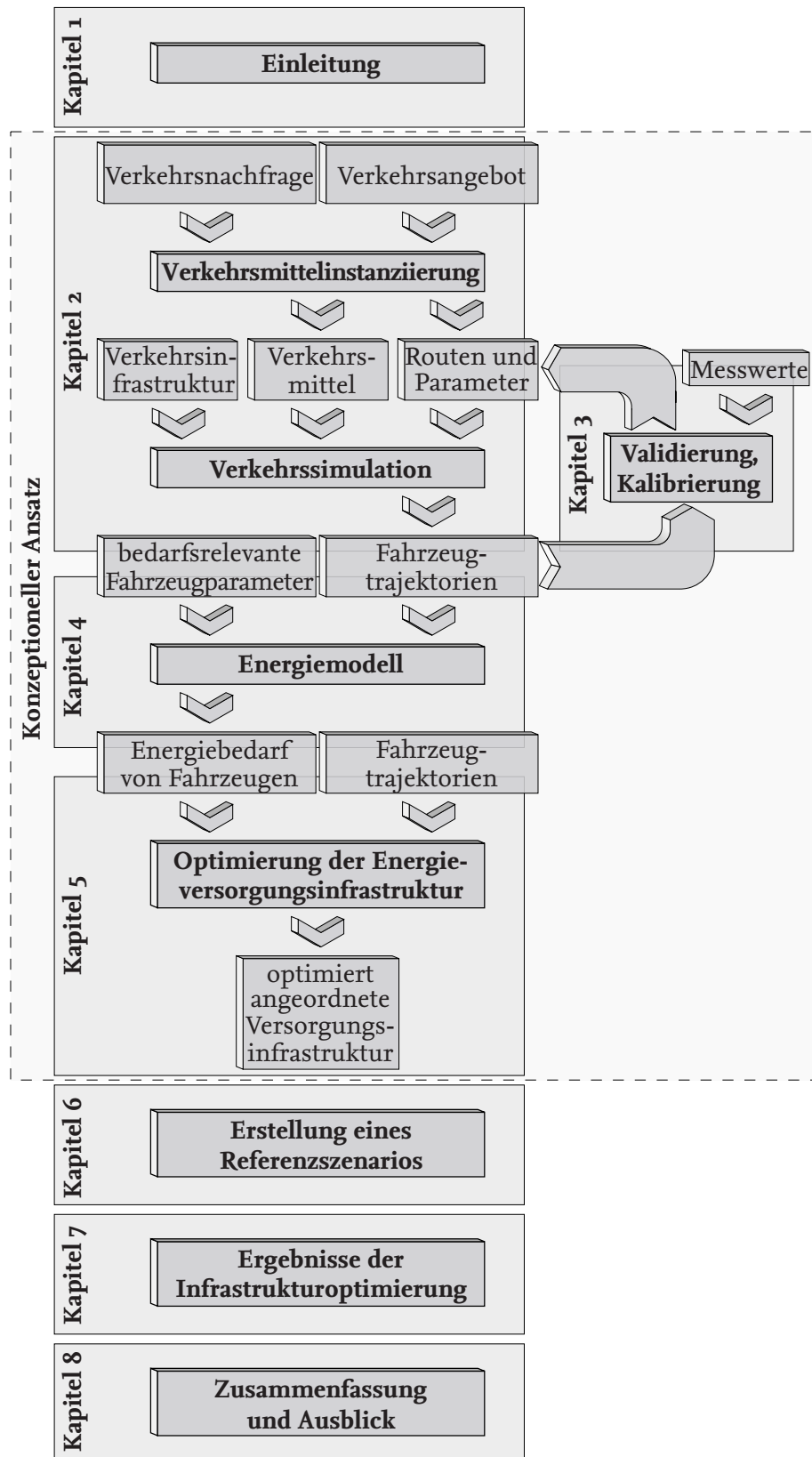


Abbildung 1.3.: Konzeptioneller Ansatz und Struktur der Arbeit



# 2 Verkehrsmodellierung und -simulation

Verkehr ist das Resultat des Mobilitätsbedarfs von Individuen, deren Verkehrsteilnahme sich durch unterschiedliche Pläne und Verhaltensweisen ausprägt. Die Komplexität von Verkehrssystemen steigt dabei aufgrund ihrer kombinatorischen Entscheidungsvielfalt: Verkehrsteilnehmer wählen ein für ihr jeweiliges Ziel passendes Verkehrsmittel mit einer geeigneten Route aus. Daraus erwächst unter Berücksichtigung aller Verkehrsteilnehmer eines Untersuchungsraums ein Verkehrssystemverhalten, welches einerseits stets durch strategische, taktische und betriebliche Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer beeinflusst wird [FGSV, 2006]. Weitere Komplexität ergibt sich andererseits aus der Verkehrsregelung, die sich sowohl aus der Gesetzgebung (z. B. Straßenverkehrsordnung) als auch der Verkehrsorganisation (z. B. Lichtsignalanlagen) ergibt [Schnieder et al., 2007]. Für die Berücksichtigung dieser Entscheidungen, Verhaltensweisen, Regelungen und Steuerungen erfordert die Modellierung des Verkehrs hybride Modelle. Durch die Komplexität von Verkehrssystemen und die nichtlinearen Zusammenhänge ist eine analytische Untersuchung nicht mit vertretbarem Aufwand möglich [Dallmeyer, 2014]. Mit dem vordergründigen Ziel der Verkehrsoptimierung ist es das Bestreben der Wissenschaft, das Verhalten von Verkehrssystemen mit geeigneten Methoden und Modellen in sog. *Simulationsstudien* möglichst realitätsnah nachzubilden. Simulationsstudien erlauben, dass (Optimierungs-)Maßnahmen aus diesen abgeleitet und/oder an diesen erprobt werden. In den meisten Fällen wäre deren Umsetzung im realen Verkehr mit weitaus höheren Kosten verbunden.

Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage stehen in einer gegenseitigen Wechselwirkung [Kirchhoff, 2002]. Auf Änderungen in der Verkehrsnachfrage reagiert die strategische Verkehrs- und Infrastrukturplanung meist mit einer Adaption des Verkehrsangebots zur Optimierung des Verkehrsflusses [Lohse und Schnabel, 2011]. Hierfür stehen Maßnahmen zur Verfügung, wie bspw. die Einrichtung neuer ÖPNV-Linien, Adaption der Lichtsignalzeit- und -zustandsplänen, die Anpassung der existierenden Verkehrswegeinfrastruktur oder die Schaffung neuer Verkehrswege. Änderungen des Verkehrsangebots haben wiederum eine Anpassung des Nutzerverhaltens zur Folge, die sich in der Verkehrsnachfrage auf taktischer bzw. operativer Ebene von Verkehrsteilnehmern äußert. Durch die Schaffung neuer Verkehrswege bspw. erfolgt einerseits eine Verkehrsumlegung, die sich in einer Anpassung der Routen von Verkehrsobjekten äußert. Andererseits hat diese Anpassung auch einen Einfluss auf die Verkehrsnachfrage, weil dadurch ggf. Fahrten angetreten werden, denen man sich vorher aus verschiedenen Gründen verweigert hätte. Eine Möglichkeit, um verschiedene Effekte in der Dynamik dieser Wechselwirkung zu untersuchen, wird durch die Modellierung von Verkehrskonstituenten und ihrer rechnergestützten Simulation geboten.

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Verkehrsmodellierung und -simulation

behandelt. In Abschnitt 2.1 wird eine Übersicht zum Stand von Wissenschaft und Technik bei der Simulation des Verkehrs sowie über verschiedene Modellstrukturen gegeben, bevor in Abschnitt 2.2 die Anforderungen an ein resultierendes Modell für die spätere Optimierung einer Energieversorgungsinfrastruktur formuliert werden. In Abschnitt 2.3 wird das mikroskopische Verkehrssimulationstool SUMO vorgestellt. Anschließend werden in Abschnitt 2.4 Modelle zur Beschreibung von Verkehrskonstituenten für deren Nutzung in mikroskopischen Verkehrssimulationen vorgestellt.

## 2.1. Stand von Wissenschaft und Technik

Ziel von Verkehrssimulationen ist es, den vorherrschenden Verkehr in einem Untersuchungsraum möglichst realitätsgetreu rechnergestützt nachzubilden, der sich aus der Interaktion von Verkehrskonstituenten untereinander ergibt [Dallmeyer, 2014]. Zu diesen Konstituenten gehört einerseits die Verkehrswegeinfrastruktur, die überwiegend graphentheoretisch behandelt wird, sowie die Verkehrsorganisation, die mit verkehrsleittechnischen Einrichtungen, Gesetzen, Richtlinien und Verordnungen den Verkehr regelt [Schnieder und Schnieder, 2013]. In rechnergestützten Simulationswerkzeugen werden die Definitionen der Verkehrswegeinfrastruktur und -organisation in einer Verkehrsinfrastrukturdefinition zusammengefasst, die sowohl Verkehrswege als auch die für eine realistische Modellierung erforderlichen Komponenten der Verkehrsleitung (bspw. Lichtsignalanlagen) und des Verkehrsbetriebs (bspw. Bushaltestellen) beinhaltet. Zugleich resultiert städtischer Verkehr überwiegend aus dem Mobilitätsbedarf von Personen und Gütern, die kollektiv als Verkehrsobjekte bezeichnet werden. Um ihr Verhalten im Rahmen einer Simulation realitätsgetreu nachzubilden, ist eine repräsentative Modellierung und Parametrierung auf Basis einer Kalibrierung erforderlich. Aus dem Mobilitätsbedarf resultiert die Instanziierung von Verkehrsmitteln, mit denen der gewünschte Transport von Verkehrsobjekten unter Berücksichtigung des vorherrschenden Verkehrsangebots und der Entscheidungsmöglichkeiten vorgenommen wird [Schnieder et al., 2007]. Dabei ergeben sich Interaktionen zwischen Verkehrsmitteln untereinander und mit der Verkehrsinfrastruktur, die im Rahmen einer Simulation unter Berücksichtigung vorherrschender Verkehrsregeln durch implementierte Verhaltensmodelle, Entscheidungsheuristiken und diskrete Steuerungen nachgebildet werden. Die anschließende Kalibrierung eines simulierten Verkehrsszenarios erfordert ggf. dessen mehrfache zyklische Durchführung, Validierung und Kalibrierung, um den Verkehr in einem Untersuchungsraum möglichst realitätsgetreu abzubilden [Detering, 2011; Gawron, 1998b]. Bei der Simulation des Verkehrs wird zwischen vier Modellstrukturen differenziert, mit denen das Verkehrsgeschehen makroskopisch, mesoskopisch, mikroskopisch und nanoskopisch (oder submikroskopisch) simuliert werden kann [Helbing, 1997].

### 2.1.1. Makroskopische Verkehrsmodelle

In Makroskopischen Verkehrsmodellen werden Verkehrsströme mit Gleichungen und Analogien aus der Strömungslehre und Thermodynamik beschrieben. Für eine Modellparametrierung werden zeitlich und räumlich aggregierte Messdaten verwendet, um aus der anschließenden Simulation meist gemittelte Verkehrskenngrößen vorhersagen zu können. Erste Modelle hierfür finden sich in [Lighthill und Whitham, 1955; Richards, 1956]. Im Rahmen einer makroskopischen Simulation wird der Verkehr abschnittsweise entlang einzelner Kanten betrachtet. Die



numerische Betrachtung einzelner Abschnitte (unter Berücksichtigung von Anfangswerten und Randbedingungen) umfasst den aggregierten Fluss beliebig vieler Verkehrsmittel. Die Interaktion individueller Verkehrsmittel mit ihrer Umgebung wird dabei nicht abgebildet. Weil die für eine makroskopische Verkehrssimulation erforderliche Rechenleistung in erster Linie von der Netzgröße und Anzahl betrachteter Verkehrsströme abhängt, wurde diese besonders zu Beginn der Verkehrsforschung häufig angewendet. Die Betrachtung großer Verkehrssysteme war in größeren Verkehrssystemen nur mit makroskopischen Modellen zielführend. Auch heute finden makroskopische Verkehrsmodelle bei der Simulation großer Verkehrssysteme Anwendung, insb. wenn kurze Rechendauern oder schnelle Prognosen erforderlich sind. Aus Arbeiten wie [Çetin, 2005; Grether, 2014] und den Entwicklungsbeiträgen für das Simulationswerkzeug MATSim [MATSim Community, 2016] wird deutlich, dass makroskopische Verkehrsmodelle und -simulationen trotz der Möglichkeit, das Verhalten individueller Verkehrsmittel in einem weitaus detaillierterem Umfang zu modellieren, weiterhin große Relevanz haben. Darüber hinaus bieten auch kommerzielle Produkte wie bspw. AIMSUN [TSS, 2016] die Möglichkeit, Verkehr makroskopisch zu simulieren.

### 2.1.2. Mikroskopische Verkehrsmodelle

Bei mikroskopischen Verkehrsmodellen bilden Verkehrsmittel die Grundeinheit, die entlang ihrer Verkehrswege mit Verkehrskonstituenten in ihrer Umgebung interagieren. Das Verhalten jedes einzelnen, betrachteten Verkehrsmittels ergibt sich in jedem Zeitschritt individuell unter Berücksichtigung seiner Umgebung [Helbing, 1997]. Dazu sind Modelle von Fahrer- und Fahrzeugverhalten implementiert, mit denen bspw. die Routenwahl, das Fahrzeugfolgeverhalten und die Fahrstreifenwechsel nachgebildet werden. Jedes Verkehrsmittel wird mit einem Parametersatz instanziiert. Da die erforderlichen Berechnungen für jeden Verkehrsteilnehmer in jedem Zeitschritt erfolgen, ist der Rechenaufwand für mikroskopische Verkehrsmodelle in erster Linie von der Anzahl der in der Simulation abgebildeten Verkehrsteilnehmer abhängig, liegt in den meisten Fällen jedoch erheblich höher als bei makroskopischen Modellen. Hauptsächlicher Forschungsschwerpunkt für mikroskopische Verkehrssimulationen liegt derzeit in der Modellbildung zur realistischen Nachbildung des menschlichen Fahr- und Verkehrsverhaltens sowie des Urteilsvermögens [Kesting et al., 2010a; Treiber et al., 2000; Vortisch, 2014; Wagner, 2006, 2008]. Zur Anwendung kommen sie bei verkehrlichen Analysen sowie infrastrukturellen und betrieblichen Optimierungen, bei denen das Verhalten einzelner Fahrzeuge (z. B. über die Auswertung ihrer Trajektorien) entscheidend für die Beurteilung der Maßnahmen sind. In [Detering, 2011] werden bspw. Verkehrsassistenzsysteme als Maßnahme zur Verkehrsflussoptimierung untersucht und ein Konzept zur mikroskopischen Kalibrierung und Validierung von Fahrzeugfolgemodellen vorgestellt. Weiteres Beispiel ist die online-Adaption von Lichtsignalzeit- und -zustandsplänen in [Lämmer, 2016; Lämmer et al., 2009] zur Minimierung von Verlustzeiten und der damit einhergehenden Optimierung des Verkehrsflusses. Aktuell verfügbare und gepflegte Werkzeuge zur mikroskopischen Verkehrssimulation sind unter anderen SUMO [DLR, 2016; Krajzewicz et al., 2012], VISSIM [PTV, 2016a] oder AIMSUN [TSS, 2016].

### 2.1.3. Mesoskopische Verkehrsmodelle

Der Vorteil von mikroskopischen Verkehrsmodellen und der mit ihnen einhergehenden Möglichkeit den Verkehr in einem weitaus detaillierterem Umfang nachzubilden, wurde bereits lange, bevor die notwendigen Rechenleistungen dafür verfügbar waren, erkannt. Zur Überbrückung dieses Defizits entwickelten sich mesoskopische Verkehrsmodelle, die eine detailliertere Betrachtung von individuellen Verkehrsmitteln erlauben als makroskopische Verkehrsmodelle, ohne dabei wesentlich höhere Anforderungen an die Rechenleistung zu stellen. Dabei haben sich mehrere Ausprägungen von mesoskopischen Verkehrsmodellen etabliert. Eine gängige Implementierungsform ist die Kombination von mikroskopischen mit makroskopischen Betrachtungsweisen, um in relevanten Bereichen (bspw. an Kreuzungen) eines Untersuchungsraums eine mikroskopische Verkehrsnachbildung zu ermöglichen, zur schnelleren Simulation hingegen auf eine makroskopische Modellierung zurückzugreifen. In [Nelson, 1995] erfolgt die Bewegung von Verkehrsmitteln nach einer mikroskopischen Modellstruktur individuell, resultiert jedoch aus makroskopischen Kenngrößen einzelner Netzsegmente auf denen sich die betrachteten Fahrzeuge jeweils befinden. In einer weiteren mesoskopischen Modellausprägung von [Cetin et al., 2002; Gawron, 1998a] wird der Verkehr auf jedem Fahrstreifen in zwei Abschnitte unterteilt. Der erste Abschnitt bildet den Rückstau von Fahrzeugen vor einem Knotenpunkt ab, während der zweite Abschnitt den fließenden Verkehr repräsentiert, der sich dem Rückstau nähert. In beiden Abschnitten werden die Fahrzeugbewegungen differenziert betrachtet. Wie auch bei makroskopischen Verkehrssimulationen sind mesoskopische Verkehrsmodelle und -simulationen heute insb. in großen Untersuchungsräumen relevant und werden durch Simulationswerkzeuge wie AIMSUN [TSS, 2016], MATSim [MATSim Community, 2016], VISUM [PTV, 2016b] und DYNEMO [Schwerdtfeger, 1986; Stauss, 2001] unterstützt.

### 2.1.4. Nanoskopische Verkehrsmodelle

In nanoskopischen oder submikroskopischen Verkehrsmodellen werden Verkehrsmittel und deren Verhalten wie in mikroskopischen Verkehrsmodellen einzeln betrachtet. Darüber hinaus werden sie jedoch in weitere zu berücksichtigende Substrukturen dekomponiert und entsprechend modelliert, wodurch sich der erforderliche Rechenaufwand für Verkehrsszenarien meist erhöht. Die Analysen mit nanoskopischen Verkehrsmodellen können in zwei Wirkrichtungen gegliedert werden. Einerseits erlauben sie (1. – vorwärts) die Untersuchung der Einflüsse von Substruktur-Modellen und ihrer Parameter auf das Fahrzeug- und Verkehrsverhalten, andererseits kann (2. – invers) die Folge des Fahrzeugverhaltens auf die Komponenten mittels inverser Modelle analysiert werden. In [Detering, 2011] wird als Vorteil hervorgehoben, dass nanoskopische Verkehrsmodelle bei der (Vorwärts-)Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen die Möglichkeit bieten, Verkehrsmittel, Assistenzsystem und Mensch getrennt voneinander zu betrachten. In [Kurczveil et al., 2014] wiederum wird ein inverses Modell für die Berechnung des Fahrzeugenergiebedarfs vorgestellt, bei dem die erforderliche Energie über dynamische und kinematische Beziehungen aus der Fahrzeugbewegung ermittelt wird. Nanoskopische Modelle werden heute oft mittels Erweiterungen umgesetzt, die in mikroskopische Verkehrssimulationen eingebettet werden. In den meisten Fällen kommt dabei das Verkehrssimulationswerkzeug SUMO [DLR, 2016; Krajzewicz et al., 2012] aufgrund seiner umfangreichen Programmierschnittstellen (z. B. TraCI) und seines quelloffenen Charakters zur Anwendung. Auch AIMSUN oder VISSIM bieten



hierfür funktionale Programmierschnittstellen an, die jedoch softwareseitig keine beliebigen Anpassungen durch Anwender ermöglichen.

## 2.2. Anforderungen an die Modellstruktur und ein Simulationswerkzeug

Der Aufbau einer neuen Energieversorgungsinfrastruktur erfordert die Untersuchung des *vorherrschenden* Verkehrs und seiner Teilnehmer, die von dem neuen Angebot profitieren sollen. Je nach eingesetzter Übertragungstechnologie stellt der Energietransfer spezifische Anforderungen an die korrekte Positionierung von Verkehrsmitteln auf oder in der Umgebung von statisch verbauten Komponenten der Energieversorgungsinfrastruktur. Im Fall einer konventionellen Tankstelle, an der Benzin und Diesel die Übertragungsmedien sind, wird die erforderliche Fahrzeugposition durch die Länge des Schlauchs zwischen Zapfsäule und -ventil sowie durch zulässige Fahrtrichtungen und Fahrstreifen begrenzt. Die induktive Energieübertragung hingegen stellt erheblich präzisere Anforderungen an die Fahrzeugpositionierung, damit das bei der Energieübertragung entstehende magnetische Wechselfeld (insb. das Streufeld) selbst bei Fahrzeugfehlpositionierungen keine zulässigen Grenzwerte überschreitet. Die korrekte Positionierung von Fahrzeugen gewährleistet, dass einerseits Personenschäden durch Feldexpositionen und andererseits hohe Übertragungsverluste ausgeschlossen werden. Für die infrastrukturelle Optimierung von Ladepunkten auf Basis von Ergebnissen einer Verkehrssimulation müssen folglich Anforderungen an das angewendete Simulationsmodell und dessen Modellstruktur formuliert werden.

Im Kontext der dynamischen Wechselwirkung zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage sollen Verkehrssimulationen genutzt werden, die eine Momentanaufnahme des Verkehrs darstellen. Diese Verkehrsszenarien spiegeln repräsentative Verkehrsabläufe über eine maßgebliche Dauer (bspw. während der Hauptverkehrszeit, eines Tags oder einer Woche) innerhalb eines Untersuchungsraums wider. Ziel einer Energieversorgungsinfrastruktur ist, dass Verkehrsmitteln eine Energiezufuhr in Höhe ihres Energiebedarfs gewährleistet wird. Der Energiebedarf von Verkehrsmitteln variiert dabei mit dem individuellen Fahrverhalten sowie dem betrachteten Fahrzeugtyp. Darüber hinaus trägt die Interaktion eines Verkehrsmittels mit seiner Umgebung maßgeblich zum Energiebedarf bei. Diese Interaktionen werden in erster Linie vom vorherrschenden Verkehrszustand bestimmt. Die Analyse der betrieblichen Integration von Energieübertragungsprozessen in den Verkehrsbetrieb und ihrer stochastischen Verteilungen erfordert die Berücksichtigung einzelner (simulierter) Verkehrsmittel und ihres *individuellen Verhaltens* im verwendeten Simulationswerkzeug. Die für die Energieübertragung erforderliche Positionierung von Fahrzeugen an den zugehörigen Infrastrukturkomponenten erfordert des Weiteren eine hohe Genauigkeit und somit die *räumlich kontinuierliche Nachbildung von Fahrzeugpositionen*. Es ist daher die Anwendung eines *mikroskopischen Verkehrssimulationswerkzeugs* erforderlich. Nach einem Simulationsdurchlauf müssen Fahrzeugtrajektorien bekannt sein, damit sich durch die anschließende Auswertung der individuellen räumlichen und zeitlichen Verteilungen der Fahrzeuge geeignete Positionen für die Komponenten der Energieversorgungsinfrastruktur ermitteln lassen.

Für die Berechnung des Fahrzeugenergiebedarfs sowie der infrastrukturseitigen

Energieübertragung bieten verfügbare Verkehrssimulationswerkzeuge nur unzureichende Unterstützung. Sowohl die Berechnung des Energiebedarfs als auch die Integration einer Energieversorgungsinfrastruktur und dessen Analyse in Verkehrssimulationen erfordert zusätzliche Implementierungen. Diese müssen Anwendern die Möglichkeit bieten, relevante Infrastrukturkomponenten mit den erforderlichen Funktionalitäten in Simulationsszenarien zu instanzieren. Darüber hinaus müssen sie Verkehrsmittel mit zusätzlichen Parametern instanzieren können, mit denen eine Berechnung des Fahrzeugenergiebedarfs ermöglicht wird. Für die breite Anwendbarkeit der Entwicklungen sollte sowohl das *Prozessmodell* der Energieübertragung sowie die *Berechnung des Energiebedarfs* technologieübergreifend nutzbar sein, d. h. gleichermaßen für die Analyse einer Versorgung mit Wasserstoff an Tankstellen als auch einer elektrischen Energieübertragung an Ladesäulen bzw. induktiven Ladestellen.

In Tabelle 2.1 wird ein zusammenfassender Vergleich verbreiteter Verkehrssimulationswerkzeuge und den darin verwendeten Verhaltensmodellen aus [Detering, 2011] geboten. Aufgrund seines quelloffenen Charakters und der damit einhergehenden Möglichkeit, erforderliche Implementierungen beliebig vorzunehmen, wird im Rahmen dieser Arbeit SUMO als Werkzeug für die mikroskopische Simulation von Verkehrsszenarien gewählt. Darüber hinaus erlaubt es die räumlich kontinuierliche Nachbildung des Verhaltens individueller Verkehrsmittel. Von den verfügbaren mikroskopischen Verkehrssimulationswerkzeugen bietet es zudem die größte Vielfalt an unterstützten Fahrzeugfolgmodellen und ist in dieser Hinsicht frei erweiterbar.

Die Beschreibung eines Verkehrsszenarios besteht unabhängig von der verwendeten Modellstruktur aus drei Komponenten, die zur Durchführung von Simulationen modelliert werden müssen und in Abbildung 2.1 in Form eines UML-Klassendiagramms dargestellt sind:

- Mit der *Verkehrsinfrastruktur* werden neben der Verkehrswegeinfrastruktur die erforderlichen Komponenten für die Verkehrssteuerung (z. B. Lichtsignalanlagen) beschrieben sowie sonstige Anlagen, die zur Abwicklung verkehrsbetrieblicher Prozesse erforderlich sind (z. B. Bushaltestellen).
- In dieser Arbeit wird das Verkehrsangebot für den motorisierten Straßenverkehr betrachtet. Als Verkehrsmittel wird sich daher auf (Straßen-)Fahrzeuge konzentriert. Resultierend aus der Verkehrsnachfrage werden einzelne Fahrzeugobjekte mit Verhaltensmodellen und Parametern sowie einer Route instanziiert und erben dabei die Verhaltensmodelle und Parameter von vorher definierten Fahrzeugtypen. Während ihrer Simulation interagieren einzelne Fahrzeugobjekte miteinander und mit den Komponenten der Verkehrsinfrastruktur.
- Die *Verkehrsnachfrage* instanziiert mit sog. Routern aus gegebenen Eingabeparametern (wie z. B. Fahrzeugflüsse, Tagesganglinien, Abbiegewahrscheinlichkeiten und/oder Fahrzeugtypverteilungen) konkrete Ausprägungen bzw. Objektinstanzen abstrakt definierter Verkehrsteilnehmerklassen (Fahrzeugtypen) mit festgelegten Routen.

## 2.3. Das Verkehrssimulationswerkzeug SUMO

SUMO ist ein “mikroskopisches, höchst portables, ortskontinuierliches und zeitdiskretes Verkehrssimulations-Tool” [DLR, 2016], dessen Entwicklung 2001 am Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) initiiert

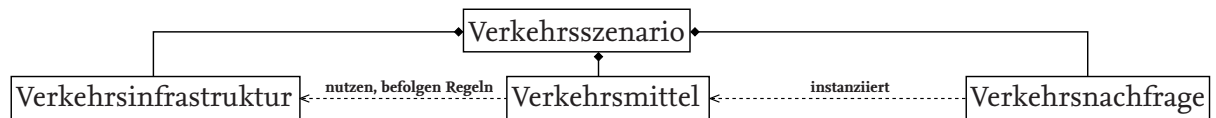


Abbildung 2.1.: Struktur der Konstituenten eines zu simulierenden Verkehrsszenarios in Form eines UML-Klassendiagramms

Tabelle 2.1.: Weiterführung und Aktualisierung der Übersicht aus [Detering, 2011] (Tabelle 4.4) über verbreitete Verkehrssimulationswerkzeuge sowie einige ihrer Eigenschaften (Stand: Nov. 2016)

Simulations- werkzeug	aktuelle Version	Modell- struktur				Fahrzeugmodelle										Platt- form	Sons- tiges								
						Fahrzeugfolge					Fahrstrei- fenwechsel														
		nanoskopisch	mikroskopisch	mesoskopisch	makroskopisch	Gazis–Herman–Rothery 1959 [Gazis et al., 1961]	Wiedemann 1974 [Wiedemann, 1974]	Gipps 1981 [Gipps, 1981]	Fritzsche 1994 [Fritzsche, 1994]	Krauß 1998 [Krauß, 1998]	Ahmed 1999 [Ahmed, 1999]	Treiber–Helbing 2002 [Treiber und Helbing, 2002]	Queue Model, Gawron 1998, Simon 1999, Cetin 2005 [Cetin et al., 2003]	Wagner 2009 [Wagner, 2008]	Sparmann 1978 [Sparmann, 1978]	Gipps 1986 [Gipps, 1986]	Fritzsche 1994 [Fritzsche, 1994]	Yang–Koutsopoulos 1996 [Yang und Koutsopoulos, 1996]	Krajzewicz 2008 [Krajzewicz, 2009]	Windows	Linux	Mac OS X	aktuell gepflegt	open-source	grafische Benutzeroberfläche
AIMSUN	8.1	○ <sup>(1)</sup>	•	•	•			•											•	•	•	•	•	•	•
MATSim	0.8.0		•	•	•														•	•	•	•	•	•	•
MITSimLab	k.A.		•			•					•	•								•				•	•
PARAMICS	6.9		•																•				○ <sup>(2)</sup>	•	•
PELOPS	k.A.	•					•													•			○ <sup>(3)</sup>	•	•
SUMO	0.28.0	○ <sup>(1)</sup>	•				•				•		•		•				•	•	•	•	•	•	•
VISSIM	9	○ <sup>(1)</sup>	•				•								•				•	•	•	•	•	•	•

<sup>1</sup>erfordert meist eigene Implementierung und ggf. Nutzung einer Programmierschnittstelle

<sup>2</sup>letztes Update ist aus dem Jahr 2012

<sup>3</sup>letztes Update ist aus dem Jahr 2011

wurde. Durch die Quelloffenlegung ist es seitdem zu einem umfangreichen Softwarepaket mit zahlreichen Funktionalitäten und Programmierschnittstellen zu einer Vielzahl anderer Programme und Datenformaten herangewachsen, dessen Nutzerkreis sich stetig erweitert hat. Eine umfangreiche Beschreibung von SUMO wird in [Krajzewicz et al., 2012] geboten.

Die Erstellung von mikroskopischen Verkehrsszeanrien in SUMO zeichnete sich über lange Zeit durch die Text-basierte Definition von .xml-Dateien und die Simulationsausführung per Kommandozeilenbefehle aus. Nur für die Simulationsdurchführung selbst existierte eine grafische Oberfläche, mit der die Zustände von Verkehrsinfrastrukturkomponenten und Verkehrsmitteln sowie deren Verhalten resultierend aus Interaktionen mit ihrer jeweiligen Umgebung visualisiert werden konnte. Trotz vielfältiger und umfangreicher Funktionen wurde dies von vielen potenziellen Nutzern als hinderlich empfunden, so dass die Wahl eines Simulationswerkzeugs oft auf kommerzielle Alternativen fiel, wenn ein besonderer Wert auf benutzerfreundliche Eingabe, Interaktion und Visualisierung gelegt wurde.

Am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Braunschweig wurde daher im Rahmen der Projekte *emil* und *InduktivLaden* das Softwarewerkzeug *eNetEditor* entwickelt [Kurzveil und López, 2015]. Es handelt sich dabei um eine MATLAB-basierte Anwendung zur Deklaration, Definition und Initialisierung aller erforderlichen sowie einer Auswahl von optionalen Konstituenten eines Verkehrsszenarios, um das *rapid prototyping* mikroskopischer Verkehrsszenarien für SUMO zu ermöglichen. Die erstellten Definitionsdateien dienen der Definition eines Verkehrsszenarios und als Eingangsgrößen für SUMO, welches eine anschließende mikroskopische Simulation ermöglicht. eNetEditor vereint dazu viele getrennte und über mehrfache Kommandozeilenbefehle auszuführende Funktionalitäten zur Erstellung von Verkehrsszenarien aus der SUMO-Distribution in einem integrierten Werkzeug mit einer anwenderfreundlichen, grafischen Benutzeroberfläche. Durch die Instanziierung der eingeführten Datenstrukturen ermöglicht es die schnelle Erstellung von Verkehrsinfrastrukturmodellen, die Definition von Fahrzeugtypen und die Instanziierung von Verkehrsmitteln basierend auf verschiedenartigen Verkehrsnachfragedefinitionen.

## 2.4. Modellierung der Verkehrskonstituenten mikroskopischer Verkehrsszenarien in SUMO

Um die Verkehrskonstituenten aus Sicht eines mikroskopisch zu simulierenden Verkehrsszenarios mit SUMO zu beschreiben, werden ihre Formalisierungen und Modellierungen in den nächsten Abschnitten vorgestellt. Es wird dabei das Diagramm in Abbildung 2.1 durch Betrachtung der drei Elementarkonstituenten (Verkehrsinfrastruktur, Verkehrsmittel, Verkehrsnachfrage) eines Verkehrsszenarios weiter dekomponiert. Die Definitionen sind an die verwendeten Datenstrukturen in SUMO und eNetEditor angelehnt. Es werden insb. die für die Zielsetzung dieser Arbeit erforderlichen Komponenten und ihre Implementierungen betrachtet. Für die Erstellung mikroskopisch zu simulierender Verkehrsszenarien bietet Anhang A durch die Auflistung beispielhafter Definitionen eine Referenz zur Modellierung eines Verkehrsszenarios in SUMO.

### 2.4.1. Verkehrsinfrastruktur

Die Modellierung des Verhaltens von Fahrzeugen in einer mikroskopischen Verkehrssimulation erfordert eine Definition der Verkehrsinfrastruktur im Untersuchungsraum. Hierzu gehören die

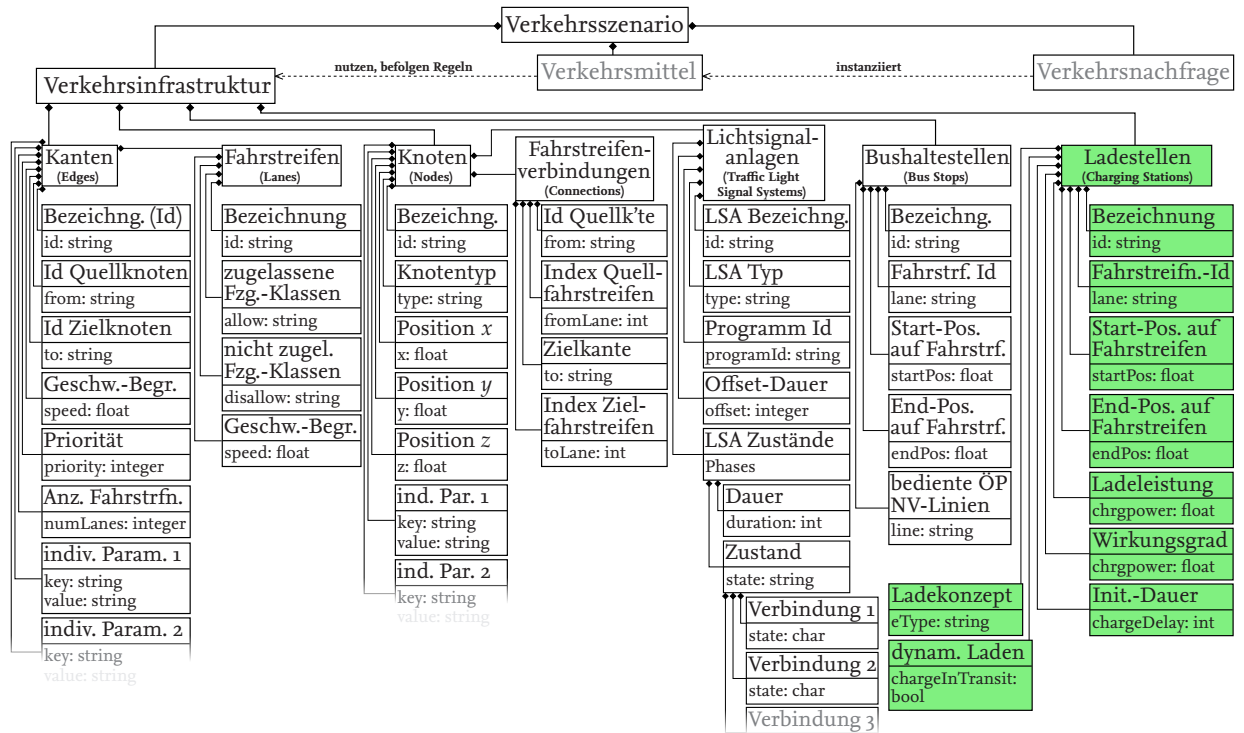


Abbildung 2.2.: UML-Diagramm der Konstituenten einer Verkehrsinfrastruktur unter Berücksichtigung ihrer Parameter für die mikroskopische Simulation von Verkehrsszenarien mit SUMO; neu eingeführte Komponenten einer Energieversorgungsinfrastruktur und deren Parameter sind farblich hervorgehoben

Verkehrswege, die über ein Netzmodell hinaus relevante Attribute beinhalten, um ein Abbild der vorherrschenden Regelungen, u. a. für den sicheren Verkehrsbetrieb, zu ermöglichen. Zusätzlich müssen Komponenten der Verkehrsinfrastruktur berücksichtigt werden, wie Lichtsignalanlagen, die wesentliche Aufgaben für die Verkehrsleitung und den Verkehrsablauf tragen und entsprechende Funktionen erfüllen.

Die Konstituenten einer Verkehrsinfrastruktur, wie sie für eine mikroskopische Verkehrssimulation in SUMO definiert werden können, sind in Abbildung 2.2 in Form eines UML-Klassendiagramms dargestellt. In den folgenden Abschnitten wird die Modellierung der Verkehrsinfrastruktur und ihrer möglichen Konstituenten mit eNetEditor zur Nutzung in SUMO beschrieben.

#### 2.4.1.1. Verkehrswegeinfrastruktur – Knoten und Kanten

Knoten und Kanten (in SUMO: nodes und edges) bilden die grundlegenden Konstituenten eines Verkehrswegeinfrastrukturmodells. Um die Fahrtrichtung von Fahrzeugen auf Fahrstreifen zu berücksichtigen, bietet sich die Modellierung mittels gerichteten Graphen an, sog. Digraphen (aus dem Englischen *directed graph*). Ein Digraph  $G = (\mathcal{O}, \mathcal{E})$  wird mit einer endlichen Knotenmenge  $\mathcal{O}$  (engl.: Vertex oder Node) und einer endlichen Kantenmenge  $\mathcal{E}$  (engl.: Edge) durch Knotenpaare  $e = (o, p)$  beschrieben (mit  $o, p \in \mathcal{O}$ ). Während sich bei überschaubaren Graphen viele Eigenschaften durch Betrachtung erschließen können, erfordert die rechentechnische Analyse und Verarbeitung

Knoten	Position		id	[...]	Typ	[...]	6 nutzerdefinierte Größen und Werte		
	$x$	$y$							
1	$x_1$	$y_1$	$id_1$	reserviert f. Handles	$t_1$	reserviert f. Handles	$^1k_1, ^1v_1$	...	$^6k_1, ^6v_1$
2	$x_2$	$y_2$	$id_2$		$t_2$		$^1k_2, ^1v_2$	...	$^6k_2, ^6v_2$
3	$x_3$	$y_3$	$id_3$		$t_3$		$^1k_3, ^1v_3$	...	$^6k_3, ^6v_3$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
$n$	$x_n$	$y_n$	$id_n$		$t_n$		$^1k_n, ^1v_n$	...	$^6k_n, ^6v_n$
	$2 \times \text{float}$		string	float	string	$2 \times \text{float}$	$2 \times \text{string}$	...	$2 \times \text{string}$

Abbildung 2.3.: Datenstruktur der Knotendefinition  $\mathcal{O}$ 

eine Kodierung. Oft kommen hierbei Matrizen oder Listen für die Attribuierung von Adjazenzen oder Inzidenzen in einem Graph zur Anwendung. Im Kontext von Verkehrssystemen orientieren sich Graphen stark am tatsächlichen Aufbau des betrachteten Verkehrsweginfrastrukturmodells. Deren Abbildung ist für die meisten Analysen erforderlich, wie z. B. für den Dijkstra- oder den A\*-Algorithmus [Dijkstra, 1959; Hart et al., 1968] zur Ermittlung kürzester Routen in einem Netz. Dass die Struktur von Graphen nicht in allen Anwendungen am strukturellen Aufbau eines betrachteten Systems orientiert sein muss, zeigt sich in der kombinatorischen Optimierung. Dort spiegeln Graphen die Struktur zur Erarbeitung einer Lösung in Form von Bäumen wider, nicht jedoch die Struktur des betrachteten Systems. Eine Übersicht über die Grundlagen der Graphentheorie findet sich z. B. in [Turau, 2009].

Die Definition von Knoten in eNetEditor erfolgt in Form einer Liste, die sämtliche Attribute und deren Werte beinhaltet. Dazu ist eine 2-dimensionale Matrix  $\mathcal{O}$  vom Datentyp Array vorgesehen:

$$\mathcal{O}^{n \times 18} = [o_{i,k}], \text{ mit } \dots \quad (2.1)$$

$$\text{Knotenindex} \quad i = 1 \dots n,$$

$$\text{Attribut-Index} \quad k = 1 \dots 18 \quad \text{und}$$

$$\text{Anzahl der Knoten} \quad n.$$

Die Struktur des eingeführten Datentyps, die neben erforderlichen Attributen die Definition von nutzerdefinierbaren Attributen (bspw. die z-Koordinate als Höhenangabe eines Knotens) ermöglicht, ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Für die spätere Nutzung in SUMO werden die Knotendefinitionen von eNetEditor mit der Tastatureingabe 'o' in eine xml-basierte Liste exportiert (mit Dateinamensendung .nod.xml) [DLR, 2011b]. Die anschließende Umsetzung der Knotendefinitionen erfolgt in der von SUMO nutzbaren Netzdefinitionsdatei (mit Dateinamensendung .net.xml) unter dem Attribut junctions (deutsch: Kreuzungen).

Für die Definition der Kanten wird in eNetEditor eine Datenstruktur in Anlehnung an die Adjazenzmatrix  $A_{\text{adj}} = [a_{i,j}]$  des zugehörigen Graphen verwendet. Die Elemente  $a_{i,j}$  bilden die Menge von 2-Tupeln  $(i, j)$ , die jeweils (gerichtete) Kanten vom Anfangsknoten  $i$  zum Endknoten  $j$  repräsentieren. Dadurch, dass sich bei mikroskopischen Verkehrssimulationen der Verkehr entlang einer Kante über mehrere Fahrstreifen (in SUMO: lanes) erstrecken kann, muss dieser Aspekt auch in der Netzdefinition berücksichtigt werden. Der Wert von  $a_{i,j} \in \mathbb{N}$  entspricht

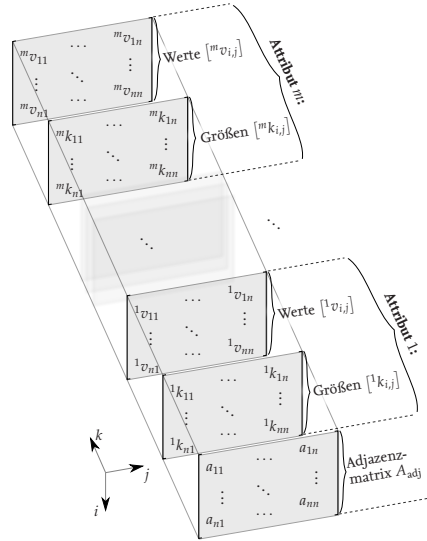


daher der Anzahl von Fahrstreifen zwischen Anfangsknoten  $i$  und Endknoten  $j$ . Darüber hinaus erfordert SUMO die Definition von Kantenattributen und ihrer Werte. Um diese Definitionen in eNetEditor darzustellen, ist für die Kantendefinitionen eine dreidimensionale Matrix  $\mathcal{E}$  vom Datentyp Array vorgesehen. Diese beinhaltet neben der Adjazenzmatrix  $A_{\text{adj}}$  auch Attribute und Werte der einzelnen Kanten:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}^{n \times n \times (2m+1)} &= [e_{i,j,h}], \text{ mit } \dots & (2.2) \\ \text{Anfangsknotenindex} & i = 1 \dots n, \\ \text{Endknotenindex} & j = 1 \dots n, \\ \text{Attributindex} & h = 1 \dots 2m + 1, \\ \text{Adjazenzmatrix} & A_{\text{adj}} = [e_{i,j,h=1}], \\ \text{Attributbezeichnungen (keys)} & \left[ \overset{1 \dots m}{k}_{i,j} \right] = [e_{i,j,h}] \text{ und } h = 2, 4, 6 \dots 2m, \\ \text{Attributwerte (values)} & \left[ \overset{1 \dots m}{v}_{i,j} \right] = [e_{i,j,h}] \text{ und } h = 3, 5, 7 \dots 2m + 1, \\ \text{Anzahl der Knoten} & n \text{ und} \\ \text{Anzahl der Kantenattribute} & m. \end{aligned}$$

Die Struktur des Datentyps für die Definition von Kanten ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Zu den erforderlichen Attributen einer Kante gehören in SUMO ihr Anfangs- und Endknoten sowie die Anzahl der Fahrstreifen. Anfangs- und Endknoten werden mit den Spalten- und Reihenindizes von Elementen der Adjazenzmatrix beschrieben und die Anzahl der Fahrstreifen mit dem Wert des Elements. Darüber hinaus muss jede Kante mit einer Bezeichnung, einer Priorität und einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit attribuiert werden. Die Priorität einer Kante dient neben der Vorfahrtsregelung im Rahmen der Verkehrsleitung und deren Implementierung an Kreuzungen auch ihrer Klassifizierung gemäß OpenStreetMap, die sich bei der digitalen Kartierung als Richtlinie etabliert hat [RalfZ, 2006]. Darüber hinaus ist die Definition von benutzerdefinierbaren Attributen (bspw. Tagesgangprofil oder Verkehrsstärke) möglich, die jedoch außerhalb von SUMO einen Interpreter zur Weiterverarbeitung erfordern. Für eine Nutzung in SUMO wird die Kantendefinition von eNetEditor mit der Tastatureingabe 'e' in eine xml-basierten Liste exportiert (mit Dateinamensendung .edg.xml) [DLR, 2011b].

Nach der Definition von Knoten und Kanten ist erstmals die Erstellung einer Netzdefinitionsdatei möglich. Während die Erstellung von Knoten und Kanten in der grafischen Benutzeroberfläche von eNetEditor über Eingaben mit der Maus erfolgt, wird die zugehörige Infrastrukturdefinitionsdatei mit der Tastatureingabe 'n' erstellt. Dazu werden die Definitionen in Form von .xml-Dateien mit den Optionen -n (für die Knotendefinitionen) und -e (für die Kantendefinitionen) an die SUMO-Applikation netconvert.exe übergeben, die eine aggregierte Netzbeschreibung in einem festgelegten .xml-Format (mit Dateinamensendung .net.xml) erstellt. Diese kann anschließend in SUMO für mikroskopische Verkehrssimulationen genutzt werden. Bei der Erstellung kommen Entscheidungsheuristiken zur Anwendung, um fehlende Informationen, insb. fahstreifenbasierte Abbiegerelationen an Kreuzungen sowie Signalzeit- und -zustandspläne von Lichtsignalanlagen, abzuschätzen. Nur selten werden in deren Ergebnissen tatsächlich vorherrschende Bedingungen und Regelungen einer betrachteten Verkehrsinfrastruktur reflektiert.

Abbildung 2.4.: Datenstruktur der Kantendefinition  $\mathcal{E}$ 

In den nächsten Abschnitten werden daher optionale (jedoch häufig erforderliche) Definitionen für die detailliertere Beschreibung einer zu betrachtenden Verkehrsinfrastruktur vorgestellt.

#### 2.4.1.2. Fahrstreifenverbindungen an Knoten

In SUMO wird zwischen Kanten (in SUMO: edges) und Fahrstreifen (in SUMO: lanes) differenziert, wobei Fahrstreifen Bestandteile einer Kante sind. Fahrstreifen einer Kante werden beginnend beim äußersten Fahrstreifen mit dem Index 0 in aufsteigender Reihenfolge indiziert.

Die meisten Knoten eines Verkehrswegeinfrastrukturmodells haben mindestens eine eingehende und eine ausgehende Kante. Um Abbiegevorgänge von Fahrzeugen an Kreuzungen nach Vorgaben des/der vorherrschenden Verkehrs/-regeln simulativ nachzubilden, sind fahrstreifenspezifische Abbiegerelationen an Knoten zu definieren, die die zulässigen Verbindungen (in SUMO: connections) zwischen Fahrstreifen spezifizieren. Bei fehlenden Angaben können diese zwar von SUMOs Applikation `netconvert.exe` allein auch aus Knoten und Kanten über generische Annahmen geschätzt werden, jedoch entspricht das Resultat selbst bei kleinen Kreuzungen aufgrund der vielen Lösungsmöglichkeiten nur selten der realen Struktur einer Kreuzung. In Abbildung 2.5 ist eine Kreuzung und deren Abbild in SUMOs grafischer Benutzeroberfläche mit Visualisierung zulässiger Fahrstreifenverbindungen dargestellt. Mit ihr wird verdeutlicht, dass selbst überschaubare Kreuzungsstrukturen einen erheblichen Modellierungsaufwand bei der Spezifikation zulässiger Verbindungen zur Folge haben.

Da diese Verbindungen fahrstreifenspezifische Angaben sind, hat jede Verbindung 6 Freiheitsgrade die mit dem Eingangsfahrstreifen (spezifiziert mit dessen (1) Anfangs- und (2) Endknoten sowie (3) Fahrstreifenindex) und Ausgangsfahrstreifen (spezifiziert mit dessen (4) Anfangs- und (5) Endknoten sowie (6) Fahrstreifenindex) zueinander in Relation gesetzt werden müssen. Um eingehenden Fahrstreifen eine Menge von zulässigen ausgehenden Fahrstreifen zuzuweisen, ist in eNetEditor eine 3-dimensionale Matrix  $C$  vom Datentyp Array vorgesehen:

$$C^{n \times n \times l} = \left[ c_{i,j,k} \right], \text{ mit } \dots \quad (2.3)$$



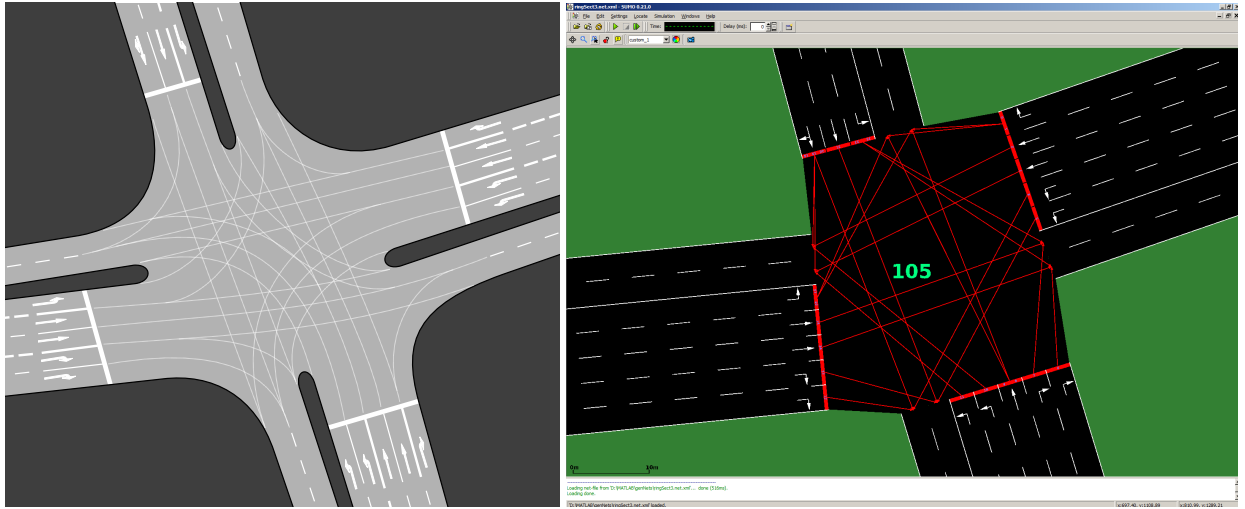


Abbildung 2.5.: Schema einer Kreuzungstopologie (links) und dessen Abbild in SUMOs grafischer Benutzeroberfläche (rechts)

Anfangsknotenindex des eingehenden Fahrstreifens  $i = 1 \dots n$ ,

Endknotenindex des eingehenden Fahrstreifens  $j = 1 \dots n$ ,

Fahrstreifenindex des eingehenden Fahrstreifens  $k = 1 \dots l$ ,

Anzahl der Knoten  $n$  und

max. Anzahl von Fahrstreifen einer Kante  $l$ .

Die Indizes  $i$ ,  $j$  und  $k$  der einzelnen Elemente  $c_{i,j,k}$  spezifizieren die erforderlichen Parameter eines eingehenden Fahrstreifens und beinhalten selbst eine Liste mit Parametern für die Spezifikation zulässiger ausgehender Fahrstreifen:

$$c_{i,j,k} = \begin{bmatrix} r_1 & s_1 & t_1 \\ r_2 & s_2 & t_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_u & s_u & t_u \end{bmatrix}, \text{ mit } \dots \quad (2.4)$$

Anfangsknotenindex des ausgehenden Fahrstreifens  $r = 1 \dots n$ ,

Endknotenindex des ausgehenden Fahrstreifens  $s = 1 \dots n$ ,

Fahrstreifenindex des ausgehenden Fahrstreifens  $t = 1 \dots l$ ,

Anzahl der Knoten  $n$ ,

max. Anzahl von Fahrstreifen einer Kante  $l$  und

Anzahl der Verbindungen des eingehenden Fahrstreifens  $u$ .

Für SUMO erfolgt die Definition von Fahrstreifenverbindungen in einer xml-basierten Liste (mit Dateinamensendung `.con.xml`). Der Dialog zur Definition von Fahrstreifenverbindungen wird mit der Tastatureingabe 'c' aufgerufen und die xml-Datei automatisch mit Schließen des Dialogs erstellt. Die anschließende Umsetzung zulässiger Fahrstreifenverbindungen an Kreuzungen erfolgt in der Netzdefinitionsdatei (mit Dateinamensendung `.net.xml`) unter dem Attribut `links`, für deren

Erstellung die Definition der Fahrstreifenverbindungen an `netconvert.exe` mit der Option `-x` übergeben wird [DLR, 2011b].

#### 2.4.1.3. Individuelle Parametrierung einzelner Fahrstreifen

Neben der kollektiven Attribuierung aller Fahrstreifen einer Kante erfordert die realistische Abbildung des Verkehrsbetriebs in manchen Fällen die individuelle Attribuierung einzelner Fahrstreifen, um diese von den restlichen Fahrstreifen derselben Kante differenzieren zu können. Diese ermöglichen fahrstreifenspezifische Geschwindigkeitsbegrenzungen, Definition von Sonderfahrstreifen (zur ausschließlichen Nutzung durch festgelegte Fahrzeugklassen) sowie benutzerdefinierte Fahrstreifenbreiten. Für die optionale Definition dieser Attribute ist in eNetEditor eine 2-dimensionale Matrix  $R$  vom Datentyp Array vorgesehen:

$$R^{5 \times l_s} = [r_i], \text{ mit } \dots \quad (2.5)$$

Spezifikation des Fahrstreifens  $i$ :  $r_i$ ,  
 Index der Fahrstreifenspezifikation:  $i = 1 \dots l_s$  und  
 Anzahl der Fahrstreifenspezifikationen:  $l_s$ .

Jedes Element  $r_i$  beinhaltet die Parameter eines zugehörigen Fahrstreifens  $l_i$ :

$$r_i = \begin{bmatrix} {}^L d_i & a_i & d_i & s_i & w_i \end{bmatrix}, \text{ mit } \dots \quad (2.6)$$

Bezeichnung des Fahrstreifens  $l_i$ :  ${}^L d_i$ ,  
 auf Fahrstreifen  $l_i$  zugelassene Fahrzeugklassen:  $a_i$ ,  
 auf Fahrstreifen  $l_i$  **nicht** zugelassene Fahrzeugklassen:  $d_i$ ,  
 Geschwindigkeitsbegrenzung auf Fahrstreifen  $l_i$ :  $s_i$  (in  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ) und  
 Breite des Fahrstreifens  $l_i$ :  $w_i$  (in m).

Die Parameter  $a_i$  und  $d_i$  beziehen sich dabei auf die *Klasse* einer Fahrzeugtypdefinition. Die Fahrzeugklasse stellt bei SUMO einen abstrakten Parameter dar, dessen mögliche Werte bei der Fahrzeugtypdefinition in Tabelle 2.3 aufgelistet sind.

Für SUMO wird die Parametrierung individueller Fahrstreifen in der bestehenden xml-Datei der Kantendefinitionen (mit Dateinamensendung `.edg.xml`) vorgenommen und anschließend an `netconvert.exe` übergeben. In eNetEditor wird mit der Tastatureingabe 'r' ein Dialog für die Fahrstreifenspezifikationen aufgerufen, welcher beim Schließen die Spezifikationen in der Kantendefinitionsdatei vornimmt. Die Spezifikation von individuellen Fahrstreifenparametern erfordert in eNetEditor eine anschließende Neuerstellung der Infrastrukturdefinitionsdatei über die Tastatureingabe 'n'.

#### 2.4.1.4. Haltestellen

Ein Großteil der Verkehrsleistung in Metropolen wird durch den ÖPNV erbracht, der in einer Nachbildung des Verkehrsbetriebs in Verkehrssimulationen folglich berücksichtigt werden muss. Infrastrukturseitig erfordert dies die Modellierung von Haltestellen, um Fahrzeug- und Verkehrsprozesse bedingt durch Ein-, Aus- und Umstiegsbedarf von Passagieren und den Einfluss

auf übrige Verkehrsteilnehmer abzubilden. Für die Definition von Haltestellen ist in eNetEditor eine 2-dimensionale Matrix  $B$  vom Datentyp Array vorgesehen:

$$B^{5 \times b_s} = [\underline{b}_i], \text{ mit } \dots \quad (2.7)$$

Spezifikation der Haltestelle  $i$ :  $\underline{b}_i$ ,  
Haltestellenindex:  $i = 1 \dots b_s$  und  
Anzahl definierter Haltestellen:  $b_s$ .

Jedes Element  $\underline{b}_i$  beinhaltet alle erforderlichen Parameter einer Haltestellendefinition:

$$\underline{b}_i = \left[ \begin{array}{ccccc} {}^B d_i & l_i & {}^B j_i & {}^B x_{s,i} & {}^B x_{e,i} \end{array} \right], \text{ mit } \dots \quad (2.8)$$

Bezeichnung der Haltestelle  $i$ :  ${}^B d_i$ ,  
Bezeichnung des Fahrstreifens, auf dem Haltestelle  $i$  angeordnet ist:  $l_i$ ,  
laufender Index der Haltestelle  $i$  auf Fahrstreifen  $l_i$ :  ${}^B j_i = 1 \dots 26$ ,  
Startposition der Haltestelle  $i$  auf Fahrstreifen  $l_i$ :  ${}^B x_{s,i}$  (in m) und  
Endposition der Haltestelle  $i$  auf Fahrstreifen  $l_i$ :  ${}^B x_{e,i}$  (in m).

Die Definition von Haltestellen erfolgt in SUMO mithilfe optionaler (sog. *additional*) Dateien (mit Dateinamensendung *.add.stops.xml*). Diese werden der Konfigurationsdatei von Simulationen (mit Dateinamensendung *.sumocfg*) unter dem Attribut *additional* übergeben [DLR, 2009d]. In eNetEditor wird mit der Tastatureingabe 'b' ein Dialogfeld zur Spezifikation von Haltestellen aufgerufen und mit dessen Schließen diese Definitionen in die *additional.xml*-Datei exportiert. Die Definition von Haltestellen ermöglicht bei der späteren Definition von Fahrzeuginstanzen die Spezifikation von Fahrzeughalten.

#### 2.4.1.5. Lichtsignalanlagen

Während die Verkehrsbeeinflussung auf Autobahnen überwiegend durch Geschwindigkeitsbegrenzungen (teils dynamisch durch Wechselverkehrszeichen) erfolgt, spielen bei der Optimierung des städtischen Verkehrs Lichtsignalanlagen eine maßgebliche Rolle. Seit der Inbetriebnahme erster Lichtsignalanlagen zur Gewährleistung einer sicheren Verkehrsführung, sind immer mehr die Bestrebungen nach Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit durch adaptive Steuerungsstrategien in den Fokus der Forschung gerückt. Ziel ist die Minimierung von Fahrdauern, Kraftstoffbedarf und/oder Schadstoffemissionen [Friedrich, 2014].

Die Definition von Lichtsignalanlagen in SUMO [DLR, 2009e] beginnt mit der Attribuierung eines Knotens mit dem Typ *traffic\_light*. Anschließend bestehen zwei Möglichkeiten für seine weitere Parametrierung, einschließlich der Signalzeit- und -zustandspläne. Es folgt entweder eine a-priori Definition von Signalzeit- und -zustandsplänen durch die jeweiligen Zustandsdefinitionen und Dauern unter Berücksichtigung bestehender (Fahrstreifen-)Verbindungen (in SUMO: *links*). Diese Definitionen können in Form einer *additional.xml*-Datei an *netconvert.exe* übergeben werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, die Parametrierung a-posteriori an einer von *netconvert.exe* bereits erstellten Netzdefinitionsdatei (mit Dateinamensendung *.net.xml*) vorzunehmen. Die darin definierten Signalzeit- und -zustandspläne stellen eine zulässige Initialisierung dar, deren Vorteil darin liegt, dass alle Verbindungen bzw. Links bereits berücksichtigt sind und nicht vorab aus

Tabelle 2.2.: Liste aller möglichen Zustände für bestehende Fahrstreifenverbindungen (sog. Links) bei der Parametrierung von Signalzeit- und -zustandsplänen einer Lichtsignalanlage [DLR, 2009e]

Zustandswert	Beschreibung
r	<i>rot</i> ; Fahrzeuge müssen halten
y	<i>gelb</i> ; Fahrzeuge bremsen, falls mit aktueller Fahrzeuggeschwindigkeit kein sicheres Überqueren der Kreuzung möglich ist
g	<i>grün</i> ohne Priorität; Fahrzeuge dürfen Kreuzung überqueren, müssen jedoch Fahrzeugen auf höher priorisierten Links Vorfahrt gewähren
G	<i>grün</i> mit Priorität; Fahrzeuge dürfen Kreuzung überqueren
u	<i>rot-grün</i> ; kennzeichnet bevorstehenden Wechsel auf Zustand <i>grün</i>
o	<i>aus</i> (Lichtsignal blinkend); Fahrzeuge müssen Vorfahrt gewähren
O	<i>aus</i> (kein Lichtsignal); Fahrzeuge dürfen Kreuzung überqueren und haben Vorfahrt

den Knoten-, Kanten- und Verbindungsdefinitionen ermittelt werden müssen. Diese initialen Schätzungen entsprechen jedoch nur selten den tatsächlichen Signalzeit- und -zustandsplänen.

In beiden Fällen ist die Beschreibung der statischen Signalzeit- und -zustandspläne identisch. Jede Lichtsignalanlage wird durch eine Folge von Phasen definiert, die wiederum jeweils durch einen Zustandsvektor (vom Datentyp String) und eine Dauer (vom Datentyp Integer) beschrieben werden. Die einzelnen Elemente des Zustandsvektors spiegeln dabei die Zustände jeder einzelnen Fahrstreifenverbindungen bzw. Links wider (pro Verbindung ein Zustand vom Datentyp Character; im Uhrzeigersinn, beginnend bei Link 0 mit Nord-Süd-Ausrichtung). Die Zustände von Fahrstreifenverbindungen können die in Tabelle 2.2 aufgelisteten Werte annehmen. Durch die Bildung von Polygonen, die während der Netzdateierstellung die Kreuzungsbereiche (u. a. für die Visualisierung) festlegen, kann es bei der vorher beschriebenen a-priori-Definition von Signalzeit- und -zustandsplänen zu fehlerhaften Ergebnissen bei der Parametrierung kommen, weshalb die a-posteriori-Parametrierung bevorzugt wird. Signalzeit- und -zustandspläne von Lichtsignalanlagen werden unter dem Attribut `tlLogic` definiert. Im Fall einer a-priori-Definition der Signalzeit- und -zustandspläne muss die zugehörige Datei (mit Dateinamensendung `.add.xml`) an `netconvert.exe` mit der Option `-a` übergeben werden.

Dadurch, dass Lichtsignalanlagen überwiegend von statischen Programmen gesteuert werden, kann das reale Verkehrsverhalten im Rahmen mikroskopischer Verkehrssimulationen bei kurzen Betrachtungsdauern oft mit diesen (unter Vernachlässigung bedarfsgesteuerter Anlagen) approximiert werden. In der Praxis kommen bei Lichtsignalanlagen verschiedene (statische) Programme zum Einsatz, zwischen denen (insb. bei asymmetrischer Auslastung von Verkehrswegen) im Laufe eines Tages und/oder einer Woche gewechselt wird. Diese sog. Wochenschaltautomatiken (WAUT) werden bei der Definition von Lichtsignalanlagen in SUMO unter dem Attribut `WAUT` definiert. Diese greifen auf bereits existierende `tlLogic`-Definitionen zurück und werden mit Zeitpunkten zum Umschalten auf ein festzulegendes Programm attribuiert. Die Simulationszeit wird bei SUMO in Sekunden angegeben. Das bedingt, dass eine Woche am Montag um 00:00:00 Uhr mit der Simulationszeit 0.0 s beginnt und am Sonntag um 23:59:59 Uhr mit der Simulationszeit 604799.0 s endet.

Zudem bietet SUMO die Möglichkeit, *bedarfsgesteuerte* Lichtsignalanlagen zu definieren und zu parametrieren. Kreuzungen mit Lichtsignalanlagen werden hierfür auf den eingehenden Kanten Induktionssensoren vorgelagert, welche die Dauer zwischen aufeinander folgenden Fahrzeugen ermitteln und somit den Durchflussbedarf bewerten. Liegt die Zeitlücke zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen unter dem mit *max-gap* festgelegten Grenzwert (ein fester Parameter einer Lichtsignalanlage), wird die aktuelle Phase so lange zeitlich hinausgezögert, bis die Dauer der Phase den Wert des *maxDur*-Attributs der Phase überschritten hat. In jedem Fall dauert die Phase jedoch so lange, wie sie mit dem Wert des Attributs *minDur* festgelegt wird [DLR, 2009e].

Eine weitere Möglichkeit zur Steuerung von Lichtsignalanlagen in SUMO besteht durch Verwendung der sog. *Traffic Control Interface* (kurz: *TraCI*). Es handelt sich dabei um eine Programmierschnittstelle, die Anwendern neben Lichtsignalanlagen den Zugriff auf eine Vielzahl weiterer Simulationsobjekte und ihre Parameter während der Laufzeit in SUMO erlaubt, um diese auszulesen oder zu verändern [DLR, 2006; Wegener et al., 2008].

Wird in *eNetEditor* mit der Tastatureingabe ‘n’ eine Infrastrukturdefinitionsdatei für SUMO erstellt, erfolgt automatisch eine Ausgabe der bestehenden Fahrstreifenverbindungen an Knoten, die mit einer Lichtsignalanlage instanziiert sind. Dabei werden die Indizes aufgelistet, um bei der a-posteriori-Parametrierung der Lichtsignalzeit- und -zustandpläne an diesen Knoten zu unterstützen.

#### 2.4.1.6. Komponenten einer Energieversorgungsinfrastruktur

In [Kurzveil et al., 2014] werden Erweiterungen für SUMO vorgestellt, die eine Instanziierung von Infrastrukturkomponenten für die Energieversorgung von Verkehrsmitteln ermöglichen. Diese Komponenten erfüllen die generische Funktion der Energieübertragung in Fahrzeuge, so dass sie gleichermaßen für die Abbildung neuartiger sowie konventioneller Energieversorgungskonzepte in mikroskopischen Verkehrssimulationen genutzt werden können. Bei der Definition dieser Komponenten müssen folgende Parameter berücksichtigt werden:

- die Position (Fahrstreifen, Start- und Endposition),
- die Leistung, mit der die Energieübertragung erfolgt,
- der Wirkungsgrad der Energieübertragung,
- die Dauer ab Ankunft eines Fahrzeugs an der jeweiligen Komponente (definiert durch die Position) bis zum Beginn der Energieübertragung,
- ein Parameter, der angibt, ob eine (dynamische) Energieübertragung möglich ist, wenn das Fahrzeug sich bewegt,  $\left(v_{\text{Fzg}} \neq 0 \frac{\text{km}}{\text{h}}\right)$  und
- ein Parameter zur Spezifikation der Energieübertragungstechnologie und kompatibler Fahrzeuge.

Da im Kontext dieser Arbeit die Auslegung einer Energieversorgungsinfrastruktur für Elektrofahrzeuge behandelt wird, werden diese Komponenten im weiteren Verlauf dieser Arbeit auch als *Ladestellen* bezeichnet. Die Definition von Ladestellen erfolgt in Form einer xml-basierten Liste, für deren Spezifikation eine 2-dimensionale Matrix  $\mathcal{T}$  vom Datentyp Array vorgesehen ist:

$$\mathcal{T}^{10 \times t_{cs}} = [t_i], \text{ mit } \dots \quad (2.9)$$

Spezifikation der Ladestelle  $i$ :  $\underline{t}_i$ ,  
 Ladestellenindex:  $i = 1 \dots t_{cs}$  und  
 Anzahl definierter Ladestellen:  $t_{cs}$ .

Jedes Element  $\underline{t}_i$  beinhaltet alle erforderlichen Parameter einer Ladestellendefinition:

$$\underline{t}_i = \left[ \begin{array}{cccccccccc} {}^T d_i & l_i & {}^T j_i & {}^T x_{s,i} & {}^T x_{e,i} & {}^T P_i & {}^T \eta_i & T_{s,i} & d_i & c_i \end{array} \right], \text{ mit } \dots \quad (2.10)$$

Bezeichnung der Ladestelle  $i$ :  ${}^T d_i$ ,

Bezeichng. d. Fahrstreifens, auf dem Ladestelle  $i$  angeordnet ist:  $l_i$ ,

laufender Index der Ladestelle  $i$  auf Fahrstreifen  $l_i$ :  ${}^T j = 1 \dots 26$ ,

Startposition der Ladestelle  $i$  auf Fahrstreifen  $l_i$ :  ${}^T x_{s,i}$  (in m),

Endposition der Haltestelle  $i$  auf Fahrstreifen  $l_i$ :  ${}^T x_{e,i}$  (in m),

Leistung der Energieübertragung an Ladestelle  $i$ :  ${}^T P_i$  (in W),

Wirkungsgrad der Energieübertragung an Ladestelle  $i$ :  ${}^T \eta_i \in \mathbb{R} [0; 1]$ ,

Dauer nach Ankunft eines Fahrzeugs an Ladestelle  $i$  ...

... bis Beginn der Energieübertragung:  $T_{s,i}$  (in s),

binärer Parameter, der angibt, ob Ladestelle  $i$  die ...

... Energieübertragung bei  $v_{Fzg} \neq 0$  zulässt:  $d_i \in \{0 \dots \text{nein}; 1 \dots \text{ja}\}$  und

Energieübertragungskonzept der Ladestelle  $i$ :  $c_i$ .

Die Definition von Ladestellen erfolgt in einer optionalen xml-Datei (mit Dateinamensendung `.add.chrg.xml`). Diese kann anschließend der Konfigurationsdatei einer Simulation (mit Dateinendung `.sumocfg`) unter dem Attribut `additional` übergeben werden. In eNetEditor wird mit der Tastatureingabe 't' ein Dialogfeld zur Spezifikation von Ladestellen aufgerufen und mit dessen Schließen diese Definitionen in die `additional xml`-Datei exportiert. Eine detaillierte Beschreibung des Energieübertragungsprozesses findet sich in Abschnitt 4.2.4.

Beispielhafte Definitionen für die beschriebenen Konstituenten finden sich im Anhang unter dem Abschnitt A.1. Das Vorgehen für deren Erstellung mit `netconvert.exe` zur Nutzung in SUMO ist in Abschnitt A.1.8 beschrieben. Die erforderliche Sequenz zur Erstellung von Verkehrsinfrastrukturdefinitionen mit eNetEditor ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

## 2.4.2. Verkehrsmittel

Motorisierte Straßenfahrzeuge stellen eine mögliche Ausprägung des Verkehrs dar, mit denen der Mobilitätsbedarf von Verkehrsobjekten realisiert werden kann. Um in dieser Arbeit die Energieversorgung von Straßenfahrzeugen zu untersuchen, wird vordergründig das Verkehrsverhalten dieser betrachtet. Der Verkehr ergibt sich dabei aus dem Verhalten einzelner Fahrzeuge. Die Erstellung eines zu simulierenden Verkehrsszenarios erfordert gezwungenermaßen die Instanziierung von Verkehrsobjekten bzw. Fahrzeugen mit individuellen Verhalten. Hierzu müssen im Vorfeld die zu betrachtenden Fahrzeugtypen mit Modellen und Parametern definiert werden, mit denen sowohl Fahrzeug (z. B. Fahrzeuglänge, Maximalgeschwindigkeit, Farbe) und



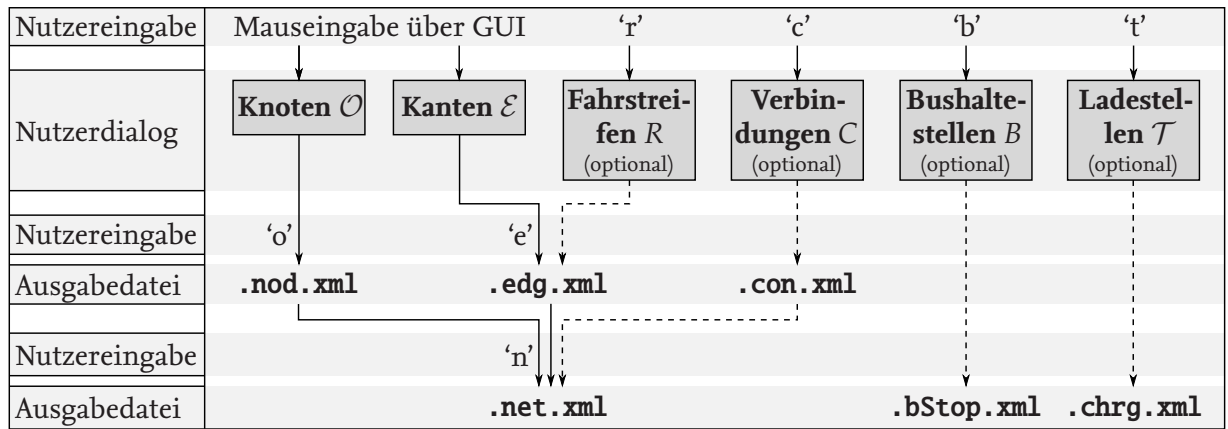


Abbildung 2.6.: Sequenz für die Erstellung einer Verkehrsinfrastrukturdefinition mit eNetEditor

Fahrer (z. B. Sicherheitsabstand, Ungeduld, Abweichung von Geschwindigkeitsbegrenzungen) als auch deren Führungsverhalten (z. B. Fahrzeugfolge- und Spurwechselmodelle sowie modellspezifische Parameter) beschrieben werden können. Um den Energiebedarf einzelner Fahrzeuge auf Grundlage ihres jeweiligen Verhaltens und Zustands ermitteln zu können, wird in [Kurzveil et al., 2014] ein Fahrzeugenergiemodell vorgestellt. Diese Implementierung für SUMO erlaubt auf Grundlage der Fahrzeugbewegung die fortlaufende Berechnung der erforderlichen Traktionsenergie während der Simulation und wird im Rahmen dieser Arbeit genutzt. Für eine repräsentative Nachbildung des Fahrzeugenergiebedarfs erfordert das Modell eine entsprechende Parametrierung der eingeführten Fahrzeugtypen.

Nach der Definition von Fahrzeugtypen können im weiteren Verlauf der Verkehrsmodellierung einzelne Fahrzeugobjekte entweder manuell oder von den Modellen und Methoden der Verkehrsnachfragegenerierung mit individuellen Fahrzeugattributen instanziiert werden. Neben der Routenbildung gehören hierzu die Erzeugung von Anfangswerten, mit denen einzelne Fahrzeugobjekte instanziiert werden. In den meisten Fällen wird diese Aufgabe von sog. Routern übernommen. Während ihres Betriebs nutzen Fahrzeuge die für das Verkehrsszenario definierte Verkehrsinfrastruktur und befolgen dabei Verkehrs- und Verhaltensregeln, die ihnen von der Verkehrsinfrastruktur und durch die Fahrzeugtypdefinitionen auferlegt werden. Die in SUMO implementierte Struktur von Verkehrsmitteln (Fahrzeuge und Fahrzeugtypen) und ihren Parametern ist in Abbildung 2.7 in Form eines UML-Klassendiagramms dargestellt. Fahrzeuge werden von der Verkehrsnachfrage mit individuellen Fahrzeugattributen instanziiert. Jede Fahrzeuginstanz benötigt dazu eine eindeutige Fahrzeug- sowie eine zugehörige Fahrzeugtypbezeichnung, einen Abfahrtzeitpunkt und eine Route. Optional kann für Fahrzeugobjekte eine Anfangsgeschwindigkeit, ein initial gewählter Fahrstreifen, eine initiale Position entlang der ersten Kante und ein Anfangsenergiegehalt spezifiziert werden. Darüber hinaus erbt jede Fahrzeuginstanz alle Verhaltensmodelle und Parameter seines spezifizierten Fahrzeugtyps.

Die Fahrzeugtypen werden in eNetEditor in Form einer Liste definiert, die die erforderlichen Attribute aller zu berücksichtigenden Fahrzeugtypen beinhaltet. Für die Definition von Fahrzeugtypen (die in SUMO per Default das in [Krauß, 1998] vorgestellte Fahrzeugfolgemodell



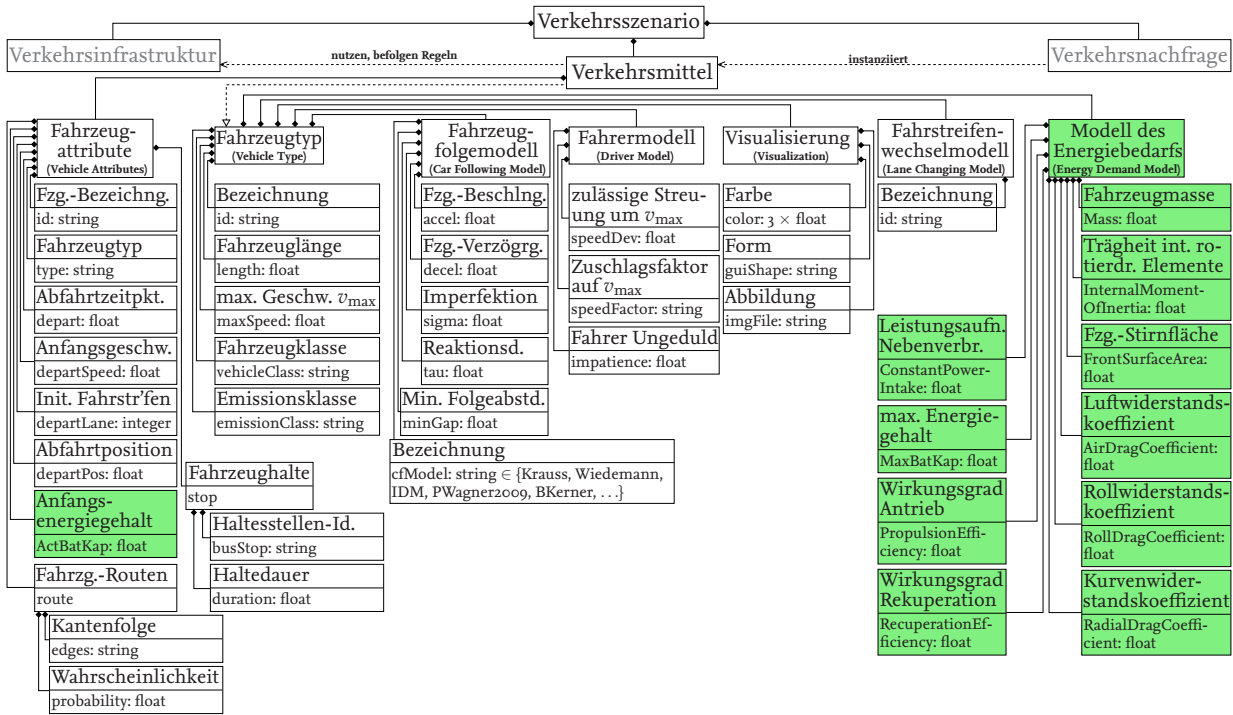


Abbildung 2.7.: UML-Klassendiagramm von Verkehrsmitteln unter Berücksichtigung ihrer Parameter für die mikroskopische Simulation von Verkehrsszenarien mit SUMO; neu eingeführte Parameter und Modelle für die Berechnung des Energiebedarfs sind farblich hervorgehoben

nutzen) ist eine 2-dimensionale Matrix  $V$  vom Datentyp Array vorgesehen:

$$V^{n_v \times 28} = [v_i], \text{ mit } \dots \quad (2.11)$$

$$\text{Fahrzeugtypindex} \quad i = 1 \dots n_v \text{ und}$$

$$\text{Anzahl der Fahrzeugtypdefinitionen} \quad n_v.$$

Jedes Element  $v_i$  beinhaltet dabei alle erforderlichen Parameter des zugehörigen Fahrzeugtyps. Die Basisparameter jedes Fahrzeugtyps sind dessen Bezeichnung (in SUMO: id), die Fahrzeuglänge (in SUMO: length) und Maximalgeschwindigkeit (in SUMO: maxSpeed). Die Spezifikation der Fahrzeugklasse (in SUMO: vClass) ermöglicht die benutzerdefinierte Zulassungsbeschränkung von Fahrzeugtypen auf ausgewählten Kanten bzw. Fahrstreifen. Zulässige Bezeichnungen für die Fahrzeugklasse sind in Tabelle 2.3 aufgelistet. Die Visualisierung von Fahrzeugobjekten in SUMOs grafischer Benutzeroberfläche wird über Parameter der Fahrzeugtypdefinition spezifiziert.

Neben den Basisparametern eines Fahrzeugtyps stellt SUMO eine Reihe an Modellen und Erweiterungen zur Verfügung, um das Verhalten von Fahrzeugobjekten zu beeinflussen oder aus deren Verhalten Berechnungen durchzuführen. Ein Beispiel hierfür ist das sog. HBEFA Device, welches auf Grundlage von Fahrzeugbewegungen eine Berechnung zur Schätzung von Schadstoffemissionen und Energiebedarf für jedes simulierte Verkehrsmittel individuell durchführt [DLR, 2009b]. Die Berechnungen der in [Keller et al., 2004] vorgestellten Modelle, erfolgen fortlaufend während einer Simulation, sofern Fahrzeugtypen mit einer *Emissionsklasse* parametrisiert sind. Ein weiteres Beispiel ist das in [Kurzveil et al., 2014] beschriebene Energiemodell, welches in der Fahrzeugtypdefinition parametrisiert werden kann und damit die

Tabelle 2.3.: Liste möglicher Fahrzeugklassen in SUMO [DLR, 2011a]

Fahrzeugklasse	Bemerkung	Fahrzeugklasse	Bemerkung
ignoring	Default-Fahrzeugklasse; unabhängig von spezifizierten Beschränkungen auf allen Fahrstreifen zugelassen	private	-
bus	Busse des städtischen Linienverkehrs	emergency	-
coach	Busse des Überlandverkehrs	authority	-
truck	Lastkraftwagen	emergency	-
trailer	Lastkraftwagen mit Anhänger	authority	-
tram	nur auf Schienen zugelassen	army	-
rail_urban	z. B. S-Bahn; nur auf Schienen zugelassen	vip	-
rail	nur auf Schienen zugelassen	passenger	-
rail_electric	nur auf Schienen zugelassen	taxi	-
moped	motorisiertes Zweirad; nicht zugelassen auf Schnellstraßen und Autobahnen	delivery	-
evehicle	alternative/künftige Fahrzeugkonzepte	bicycle	-
custom1	reserviert für benutzerdef. Semantik	motorcycle	-
custom2	reserviert für benutzerdef. Semantik	hov	Hovercraft
		pedestrian	nur auf Gehwegen zugelassen
		ship	nur auf Gewässern zugelassen

fortlaufende Berechnung des Fahrzeugenergiebedarfs einzelner Verkehrsmittel während einer Simulation ermöglicht. Weder das Modell der Emissions- noch der Energiebedarfsberechnung nimmt dabei Einfluss auf die Fahrzeugbewegung; es handelt sich in beiden Fällen um ein inverses Modell.

Die Fahrzeugführung ist vom Fahrzeugumfeld abhängig und kann als Regelkreis aufgefasst werden [Mitschke, 2013; Schnieder und Schnieder, 2013]. Während bei der Fahrzeugführung der Transportprozess selbst als Regelstrecke angesehen wird, dessen sichtbares Ergebnis die realisierte Fahrzeugtrajektorie (messbar über die zeitabhängige Fahrzeugposition, Fahrtrichtung oder Geschwindigkeit) ist, dient derzeit überwiegend der Mensch als Messglied und Regler, der den aktuellen Prozesszustand kontinuierlich beobachtet und Regelabweichungen versucht zu minimieren. Bei der Messung und Regelung einiger Größen kann er von Fahrerassistenzsystemen unterstützt und zum Teil sogar abgelöst werden. Die Stellgrößen hierfür sind die Beschleunigung, die Bremsverzögerung, sowie der Lenkwinkel. Neben der Interaktion eines Kraftfahrzeugs mit dessen Umfeld, kann auch die Interaktion eines Fahrers mit dessen Fahrzeug als Regelkreis aufgefasst werden. Dass die Modellierung der Dynamik zwischen Fahrern und Fahrzeugen eine umfangreiche Aufgabe ist, wird in [Mitschke, 2013] dadurch begründet, dass es nicht „den Fahrer, sondern viele Fahrer mit individuellen Unterschieden“ gibt. Zudem können sich Fahrer an verschiedene (Fremd-)Fahrzeuge anpassen sowie auf Fahrsituationen (z. B. Kurven oder Fahrbahnbeschaffenheit) einstellen. Zur Vereinfachung hat sich insb. in Verkehrssimulationen die integrale Betrachtung eines Fahrzeugs als Fahrer-Fahrzeug-Einheit etabliert [Detering, 2011].

Die Regelungsaufgabe der Fahrzeugführung wird oft in Teilaufgaben aufgegliedert. Die Quer- und Längsregelung werden hierbei meist separat betrachtet [Apel und Mitschke, 1997; Wegener et al., 2011]. Um bei der Fahrzeuglängsführung die Komponenten der Fahrzeugfolgeregelung von dem Fahrerverhalten zu trennen, werden in SUMO sowohl etablierte Modelle des Fahrzeugfolge- und Spurwechselverhaltens als auch ein Fahrermodell eingeführt. Dies ermöglicht die Abbildung

und Berücksichtigung stochastischer Effekte des Fahrers bei der Fahrzeugführung. Die Modelle des Fahrer-, Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselverhaltens werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

#### 2.4.2.1. Fahrermodelle

Mit Fahrermodellen wird das Verhalten von Fahrern beschrieben. Eine simulative Nachbildung des vorherrschenden Verkehrsverhaltens mit SUMO erfordert eine repräsentative Parametrierung der Fahrermodelle. In SUMO stehen hierfür drei Modellparameter zur Verfügung, die insbesondere die Wahl der Wunschgeschwindigkeit eines Fahrers beschreiben. Deren Werte müssen in den Fahrzeugtypdefinitionen festgelegt werden und sind nachfolgend beschrieben.

##### **Streuung der Wunschgeschwindigkeit (Speed Deviation):**

Die Längsführung eines Fahrzeugs ist sowohl vom eigentlichen Regelverhalten als auch von der gewählten Wunschgeschwindigkeit eines Fahrers abhängig. Diese wird zum einen durch das Tempolimit infrastrukturseitig reglementiert sowie von der Fahrzeugleistung begrenzt. Zum anderen unterliegt die Wunschgeschwindigkeit bewussten und unterbewussten Einflüssen des Fahrers, deren Entstehung durch die unteren Grenzen des menschlichen Wahrnehmungsvermögens begründet sind. In [Wiedemann, 1974] werden diese Wahrnehmungsschwellen im Bereich des Fahrzeugfolgeverhaltens untersucht und mit *Stimulus-Response-Modellen* beschrieben.

Die Streuung der Wunschgeschwindigkeitswahl eines Fahrers lässt sich in SUMO mit dem Parameter `speedDev` festlegen.

##### **Zuschlagsfaktor der Wunschgeschwindigkeit (Speed Factor):**

Analog zur Streuung lässt sich die Fähigkeit oder Bereitschaft eines Fahrers parametrieren, ein gefordertes Tempolimit einzuhalten. Diese Abweichung setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen. Auch hier spielt die Wahrnehmungsschwelle des Fahrers eine Rolle, wird jedoch von dem Fahrstil oder der persönlichen Präferenz deutlich dominiert.

In SUMO kann diese Abweichung mit einem Zuschlagsfaktor `speedFactor` festgelegt werden. Unter Kenntnis der Parameter `speedDev` und `speedFactor` unterliegt die Wahl der Wunschgeschwindigkeit einer Normalverteilung

$$\mathcal{N}(\mu, \sigma) = \mathcal{N}(\text{speedLimit} \times \text{speedFactor}, \text{speedDev}). \quad (2.12)$$

Zu berücksichtigen ist hierbei, dass bei der Wahl der Wunschgeschwindigkeit die Einhaltung eines Sicherheitsabstands zum Vorderfahrzeug stets eine höhere Priorität hat. Zudem unterliegt die Wahl der Wunschgeschwindigkeit den physikalischen Grenzen eines Fahrzeugs, wie z. B. seiner Maximalgeschwindigkeit `maxSpeed`.

##### **Ungeduld (Impatience):**

An vorfahrtsregulierten Knoten wird das Verhalten von Fahrern bei Abbiegevorgängen auf höher priorisierte Kanten von deren Ungeduld beeinflusst. Diese wächst in der Regel an Kreuzungen beim *Warten auf eine Lücke* an.

Grundsätzlich biegt ein Fahrzeug in SUMO nur dann auf eine höher priorisierte Kante ab, wenn eine Fahrzeugkollision während des Manövers ausgeschlossen werden kann. Hierfür

kommen sog. *safety distance* bzw. *collision avoidance*-Modelle zum Einsatz [Krajzewicz et al., 2012]. Das Verhalten eines Fahrers vor einem Abbiegevorgang wird in [Erdmann und Krajzewicz, 2014] mit der Ungeduld modelliert, die in SUMO mit dem zugehörigen Wert des Attribut *impatience* spezifiziert werden kann. Beim Warten auf eine Lücke wird dieser Wert beginnend bei einem Anfangswert stetig inkrementiert, um damit die wachsende Ungeduld eines Fahrers zu simulieren. Mit der Ungeduld nimmt die Bereitschaft zu, Fahrzeuge auf höher priorisierten Knoten *auszubremsen*, und dadurch ein Abbiegen zu ermöglichen. Eine sichere Fahrzeugführung erfordert in diesem Manöver ein gutes Urteilsvermögen des Fahrers: Um Kollisionen zu vermeiden muss sowohl die Dynamik des eigenen Fahrzeugs als auch die eines herannahenden Fahrzeugs eingeschätzt werden können, insb. dessen Geschwindigkeit, Bremsvermögen und Abstand.

Mit dem Wert des Attributs *impatience* wird in SUMO der Anfangswert dieser simulierten Ungeduld festgelegt.

#### 2.4.2.2. Fahrzeugfolgemodelle

Mit sog. Fahrzeugfolgmodellen wird die Längsführung eines von einem Fahrer oder Assistenzsystem geregelten Verkehrsmittels beschrieben. Sie bilden den Kern jedes mikroskopischen Verkehrssimulationswerkzeugs. In [Rothery, 1992] wird die Fahrzeugführung in drei Teilaufgaben gegliedert:

##### 1. Wahrnehmung:

Ein Fahrer sammelt relevante, überwiegend visuelle, Informationen über die Umwelt, insb. über den Abstand zum Vorderfahrzeug.

##### 2. Entscheidungsfindung:

Die erfasste Information wird unter Berücksichtigung von Fahrzeugeigenschaften und Fahrerfahrung verarbeitet, um sich der aktuellen Fahrsituation anzupassen.

##### 3. Steuerung:

Der Fahrer gibt Stellgrößen auf das Fahrzeugsystem, um sein Regelziel je nach Fähigkeiten und Fahrstil zu erreichen.

Dieser Prozess wird oft als Regelkreis modelliert, wodurch sich die Methoden der Regelungstheorie, wie Stabilitätsanalysen, auf das Verkehrsverhalten anwenden lassen [Rothery, 1992; Schnieder et al., 2007]. Seit den 1950er Jahren haben sich für die Beschreibung des Fahrverhaltens verschiedene Modelle etabliert, die sich in die folgenden vier Modellarten gliedern:

- Stimulus Response-Modelle,
- Safety Distance-Modelle,
- Psycho-physische Modelle und
- Zellularautomaten

In den folgenden Abschnitten werden aus [Detering, 2011] zusammenfassend einige etablierte Modelle dieser vier Arten sowie deren Parametrierungen und Nutzung in SUMO vorgestellt.

**Stimulus Response-Modelle** (deutsch: Reiz-Reaktions-Modelle) dienen zur Beschreibung der Verhaltenspsychologie. Ausgehend von der Feststellung, dass die Reaktion auf einen Reiz von vielen unterschiedlichen Faktoren abhängt, wird sie in der Psychologie oft stochastisch modelliert [Newell, 1990; Rosenbloom und Newell, 1988]. Darüber hinaus hängt die Reaktion von der Sensitivität der Reizwahrnehmung ab.

Unter Nutzung dieses Zusammenhangs beschreiben die ersten Modelle das Folgeverhalten zwei aufeinander folgender Fahrzeuge  $i$  und  $i - 1$  als Funktion des Abstands (oder der Differenzgeschwindigkeit), den Fahrer durch Anpassung ihrer Geschwindigkeiten (oder durch eine Fahrzeugbeschleunigung/-bremsung) versuchen konstant zu halten (oder zu eliminieren) [Pipes, 1953; Reuschel, 1950]:

$$v_i(t) = \lambda (\Delta s_{i-1,i}(t)) \quad \left( \text{oder } \dot{v}_i(t) = \lambda (\Delta v_{i-1,i}(t)) \right) \quad (2.13)$$

Mit der Funktion  $\lambda$  wird die Sensitivität beschrieben, mit der ein Fahrer auf den durch die Abstands- oder Geschwindigkeitsdifferenz hervorgerufenen Reiz reagiert. Durch Einführung einer Reaktionsdauer  $\tau$  in [Chandler et al., 1958] sowie einer geschwindigkeitsabhängigen Sensitivitätsfunktion, resultiert die ursprünglich in [Gazis et al., 1961] formulierte (und oft als GHR-Modell bezeichnete) Modellgleichung:

$$v_i(t) = \frac{\lambda_0 v_i^m(t)}{\Delta s_{i-1,i}^l(t - \tau)} \cdot \Delta v_{i-1,i}(t - \tau). \quad (2.14)$$

Im Gegensatz zum ursprünglichen Modell in Gleichung 2.13 berücksichtigt das GHR-Modell in Gleichung 2.14 neben der Differenzgeschwindigkeit und der Fahrersensitivität den Abstand zum Vorderfahrzeug sowie die eigene Geschwindigkeit, um die resultierende Geschwindigkeitsänderung zu berechnen. Die Parameter  $m$  und  $l$  werden dabei empirisch aus Verkehrsbeobachtungen bestimmt [Brackstone und McDonald, 1999]. Mit der Beschreibung der theoretischen Grundlagen, Stabilitätsbetrachtungen und empirischen Studien für deren Parametrierung werden in [Rothery, 1992] ausführliche Details zu der Entwicklung von Fahrzeugfolgmodellen auf Basis des Stimulus-Response-Modells geboten.

Bei mikroskopischen Verkehrssimulationen findet das GHR-Modell heute nur selten Anwendung. Gründe dafür sind, dass die Modellparameter nicht an messbare physikalische Größen angelehnt sind und deren Werte bei der Kalibrierung und Betrachtung unterschiedlicher Szenarien in diversen Studien sehr hohe Streuungen aufweisen [Brackstone und McDonald, 1999].

**Safety Distance-Modelle** (oder Collision Avoidance-Modelle) basieren auf dem Bestreben eines Fahrers, einen sicheren Folgeabstand zum Vorderfahrzeug einzuhalten und Kollisionen zu vermeiden. Es erfolgt eine Adaption der eigenen Fahrzeuggeschwindigkeit, mit der Kollisionen grundsätzlich ausgeschlossen werden. Ein erstes Modell hierfür wird in [Kometani und Sasaki, 1958] vorgestellt. Das am weitesten verbreitete Safety-Distance-Modell wird in [Gipps, 1981] beschrieben, dessen wesentlicher Vorteil die verwendeten Parameter sind. Zur Beschreibung des Fahrzeugfolgeverhaltens haben diese eine offensichtliche und nachvollziehbare Relevanz bei der Charakterisierung von Fahrer-Fahrzeug-Einheiten. Das Modell geht davon aus, dass der Fahrer eine Wunschgeschwindigkeit hat, die er versucht einzuhalten. Bei Folgefahrten orientiert er sich jedoch auch an der Distanz zum Vorderfahrzeug und wählt seine Fahrzeuggeschwindigkeit gemäß



eines sicheren Folgeabstands so, dass selbst bei maximaler Verzögerung des Vorderfahrzeugs eine Kollision ausgeschlossen werden kann. Kollisionen können ausgeschlossen werden, solange das Verzögerungsvermögen des Vorderfahrzeugs nicht unterschätzt wird. Kommt es während einer Simulation in SUMO zu einer erforderlichen Notbremsung, würde ein Folgefahrzeug mit einer höheren Verzögerung bremsen, als seine Fahrzeugparameter es zulassen, um eine Kollision zu vermeiden und den minimalen Folgeabstand einzuhalten. Die Geschwindigkeitswahl eines Folgefahrzeugs errechnet sich gemäß der Gleichung 2.15:

$$v_n(t + \tau_n) = \min \left\{ v_n(t) + 2.5 a_n \tau_n \left( 1 - \frac{v_n(t)}{V_n} \right) \sqrt{0.025 + \frac{v_n(t)}{V_n}}, \dots \right. \\ \left. \dots, b_n \tau_n + \sqrt{b_n^2 \tau_n^2 - b_n \left( 2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - v_n(t) \tau_n - \frac{v_{n-1}^2(t)}{\hat{b}} \right)} \right\}, \quad (2.15)$$

mit Wunschbeschleunigung des Fahrers von Fahrzeug  $n$ :  $a_n$ ,  
Wunschverzögerung des Fahrers von Fahrzeug  $n$ :  $b_n$ ,  
eff. Länge des Fahrzeugs  $n$  (Fahrzeuglänge plus min. ...  
... Folgeabstand in Warteschlange bei  $v_n(t) = 0$ ):  $s_n$ ,  
Reaktionsdauer des Fahrers von Fahrzeug  $n$ :  $\tau_n$ ,  
Wunschgeschwindigkeit des Fahrers von Fahrzeug  $n$ :  $V_n$ ,  
durch Fahrer  $n$  geschätzte max. Wunschverzögerung ...  
... des Fahrers von Fahrzeug  $n - 1$ :  $\hat{b}$ ,  
Position der Fahrzeugfront des Fahrzeugs  $n$ :  $x_n(t)$  und  
Geschwindigkeit des Fahrzeugs  $n$ :  $v_n(t)$

Mit dem ersten Argument der min-Verzweigung wird die Geschwindigkeitswahl eines Folgefahrzeugs bei freier Fahrt ohne Vorderfahrzeuge oder bei großen Abständen zum Vorderfahrzeug beschrieben. Mit dem zweiten Argument wird die Geschwindigkeit eines Folgefahrzeugs in dichtem Verkehr begrenzt. Nachteile des Gipps-Modells sind seine Deterministik, die perfekte Fahrer mit stets gleichem Verhalten impliziert, sowie die vereinfachte Fahrzeugkinematik, die das Brems- und insb. Beschleunigungsverhalten nicht realistisch modelliert.

Ein weiteres Modell, dessen Anwendung sich bei mikroskopischen Verkehrssimulationen etabliert hat, wird in [Krauß, 1998] vorgestellt. Über das Modell von Gipps hinaus berücksichtigt dieses die Fähigkeit von Fahrern, eine Wunschgeschwindigkeit zu halten und stellt somit eine Integration des zuvor beschriebenen Fahrermodells in das Modell des Folgeverhaltens dar. Wie auch beim Modell von Gipps erfolgt die Berechnung einer *sicheren* Folgegeschwindigkeit  $v_{n, \text{sicher}}(t)$  für ein Fahrzeug  $n$ :

$$v_{n, \text{sicher}}(t) = v_{n-1}(t) + \frac{(x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)) + v_{n-1}(t) \cdot \tau_n}{\frac{v_n(t)}{b_n} + \tau_n} \quad (2.16)$$

Aus der sicheren Folgegeschwindigkeit eines Fahrzeugs  $n$  errechnet sich dessen Wunschgeschwindigkeit  $v_{n,\text{wunsch}}(t)$ . Dabei darf weder die Fahrzeuggeschwindigkeit im nächsten Zeitschritt  $v_n(t)$  die Maximalgeschwindigkeit  $v_{n,\text{max}}$  des Fahrzeugs überschreiten noch die Beschleunigung während eines Zeitschrittes (mit der Zykluszeit  $T$ ) über der Wunschbeschleunigung  $a_n$  des Fahrers von Fahrzeug  $n$  liegen:

$$v_{n,\text{wunsch}}(t) = \min \left( (v_{n,\text{sicher}}(t), v_n(t - T) + a_n \cdot T, v_{n,\text{max}}) \right) \quad (2.17)$$

Die resultierende Geschwindigkeit  $v_n(t)$  des Fahrzeugs  $n$  ist weiterhin abhängig von der Fähigkeit des Fahrers, diese Geschwindigkeit einzustellen. Diese sog. Imperfektion muss zusätzlich mit dem Parameter  $\sigma \in \mathbb{R} [0, 1]$  (in SUMO: `sigma`) angegeben werden:

$$v_n(t) = \mathcal{U}(v_{n,\text{wunsch}}(t) - \sigma \cdot a_n, v_{n,\text{wunsch}}(t)) \quad (2.18)$$

Die Geschwindigkeit unterliegt einer Gleichverteilung, die Werte im Intervall  $[v_{n,\text{wunsch}}(t) - \sigma \cdot a_n, v_{n,\text{wunsch}}(t)]$  annehmen kann. Sofern das Fahrzeugfolgemodell nicht anders spezifiziert ist, werden Fahrzeuge in SUMO per Default mit dem Fahrzeugfolgemodell nach Krauß instanziiert.

Die stetig zunehmende Verbreitung von Fahrer- und Verkehrsassistentenfunktionen in Fahrzeugen erfordert für die realistische Nachbildung von Verkehrsszenarien die Berücksichtigung ihres Verhaltens in mikroskopischen Verkehrssimulationen. Vor diesem Hintergrund wird in [Treiber et al., 2000] das *Intelligent Driver Model* (kurz: IDM) eingeführt. Zusätzlich zu einem sicheren Folgeabstand werden Anforderungen definiert, um das Modellverhalten komfortabel für Fahrzeuginsassen zu gestalten. Dabei werden insb. Rucke minimiert, d.h. die zeitliche Ableitung der Beschleunigung begrenzt<sup>(1)</sup>. Das Modell ist in Gleichung 2.19 formuliert:

$$v_n \left( t + \frac{T}{k} \right) = v_n(t) + a_n \cdot \left[ 1 - \left( \frac{v_n(t)}{V_n} \right)^{\delta_n} - \left( \frac{\Delta s_{n,\text{wunsch}}(v_n(t), v_n(t) - v_{n-1}(t))}{x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)} \right)^2 \right] \cdot \frac{T}{k} \quad (2.19)$$

mit      Beschleunigungsexponent des Fahrers von Fahrzeug  $n$ :  $\delta_n$ ,  
             Zykluszeit bzw. Schrittweite der Simulation:  $T$  und  
             Integrationsschritte pro Zykluszeit  $T$ :  $k$ .

Die übrigen Parameter und Variablen sind identisch mit denen im Modell von Krauß. Für die Anpassung der eigenen Geschwindigkeit wird die aktuelle Geschwindigkeit  $v_n(t)$  des Fahrzeugs  $n$  mit seiner Wunschgeschwindigkeit  $V_n$  sowie sein aktueller Folgeabstand  $x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)$  mit seinem Wunschabstand  $\Delta s_{n,\text{wunsch}}$  verglichen. Der Wunschabstand  $\Delta s_{n,\text{wunsch}}$  des Fahrers  $n$  berechnet sich dabei aus

$$\Delta s_{n,\text{wunsch}} = s_n + \max \left( 0, v_n(t) \cdot \tau_n + \frac{v_n(t) (v_n(t) - v_{n-1}(t))}{2\sqrt{a_n b_n}} \right) \quad (2.20)$$

<sup>(1)</sup>In [Treiber und Kesting, 2010] wird eine Grenze für komfortable Rucke von  $|da/dt| \leq 1.5 \text{ m/s}^3$  angegeben, die sich auch mit den Hinweisen aus dem Anhang des Handbuchs für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen [FGSV, 2001] zum ÖPNV-Betrieb deckt.



Tabelle 2.4.: Parameter der (Safety-Distance) Fahrzeugfolgemodelle von Krauß [Krauß, 1998] sowie Treiber, Hennecke und Helbing (IDM) [Treiber et al., 2000] in SUMO

Beschreibung	Bez. in SUMO
Wunschbeschleunigung des Fahrers $n$	accel
Wunschverzögerung des Fahrers $n$	decel
eff. Länge d. Fahrzeugs $n$ (Fahrzeuglänge <sup>1</sup> plus min. Folgeabstand <sup>2</sup> bei Stillstand $v_n(t) = 0$ )	<sup>1</sup> length, <sup>2</sup> minGap
Wunschgeschwindigkeit des Fahrers $n$	maxSpeed
Imperfektion <sup>3</sup> des Fahrers $n$	sigma
Reaktionsdauer <sup>3</sup> /Wunschzeitlücke <sup>4</sup> d. Fahrers $n$	tau
Beschleunigungsexponent <sup>4</sup> des Fahrers $n$	delta
Anzahl der Integrationsschritte pro Zyklus $T^4$	stepping

bei Nutzung des Folgemodells <sup>(3)</sup>[Krauß, 1998] bzw. <sup>(4)</sup>[Treiber et al., 2000] (IDM)

und enthält sowohl einen sog. Gleichgewichtsanteil  $s_n + v_n(t) \cdot \tau_n$  als auch einen *dynamischen* Anteil, mit dem die *intelligente* (bzw. komfortable) Fahrstrategie realisiert wird. Im Gegensatz zum Fahrzeugfolgmodell nach Krauß, steht  $\tau_n$  beim IDM für die Wunschzeitlücke des Fahrers von Fahrzeug  $n$  zum Vorderfahrzeug  $n - 1$ . Dadurch, dass das IDM keine Reaktionszeit enthält, werden das Verhalten und die Eigenschaften dieses Modells von den Autoren in [Treiber und Kesting, 2010] eher mit denen eines adaptiven Beschleunigungsreglers (engl.: Adaptive Cruise Control, kurz: ACC) verglichen. Das Modell kann jedoch mit Aspekten des menschlichen Verhaltens erweitert werden.

Die Parametrierung der Modelle von Krauß sowie Treiber et al. (IDM) erfolgt in SUMO unter Verwendung der in Tabelle 2.4 aufgelisteten Bezeichnungen.

**Psycho-physische Fahrzeugfolgemodelle** nutzen einen Modellierungsansatz, der die Grenzen des menschlichen Wahrnehmungsvermögens berücksichtigt. Mit den Arbeiten [Todosiev, 1963; Todosiev und Barbosa, 1963] veröffentlichte Todosiev seine These, dass die Fahrzeugregelung durch Fahrer kein zeitkontinuierliches Verhalten aufweist. Vielmehr zeigen Fahrer ein zeitdiskretes Verhalten, indem sie nur zu gewissen Zeitpunkten (sog. *action points*) in die Fahrzeugregelung eingreifen und ihren *Reglerausgang* anpassen. Dabei wird die Annahme getroffen, dass Fahrer ihre Beschleunigung gestuft variieren. Wiedemann begründete dieses Verhalten mit dem Vorhandensein von unteren Schwellen der menschlichen Wahrnehmung. Im Rahmen seiner Arbeit [Wiedemann, 1974] widmete er sich insb. der Wahrnehmung von Geschwindigkeitsdifferenzen sowie Abständen und erarbeitete ein Fahrzeugfolgmodell aus seinen Erkenntnissen. Aus den Wahrnehmungsschwellen des Folgeabstands und der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen ergeben sich bei einer Folgefahrt vier mögliche Betriebsregimes, deren Grenzen sowie eine beispielhafte Trajektorie in Abbildung 2.8 in Form eines Phasenportraits schematisch dargestellt sind. Diese vier Betriebszustände können wie folgt zusammengefasst werden:

**Freies Verhalten:** Der Abstand zu einem Vorderfahrzeug (sofern vorhanden) ist so groß, dass das Verhalten eines Folgefahrzeugs von diesem unbeeinflusst bleibt. Ein Fahrer ist in diesem

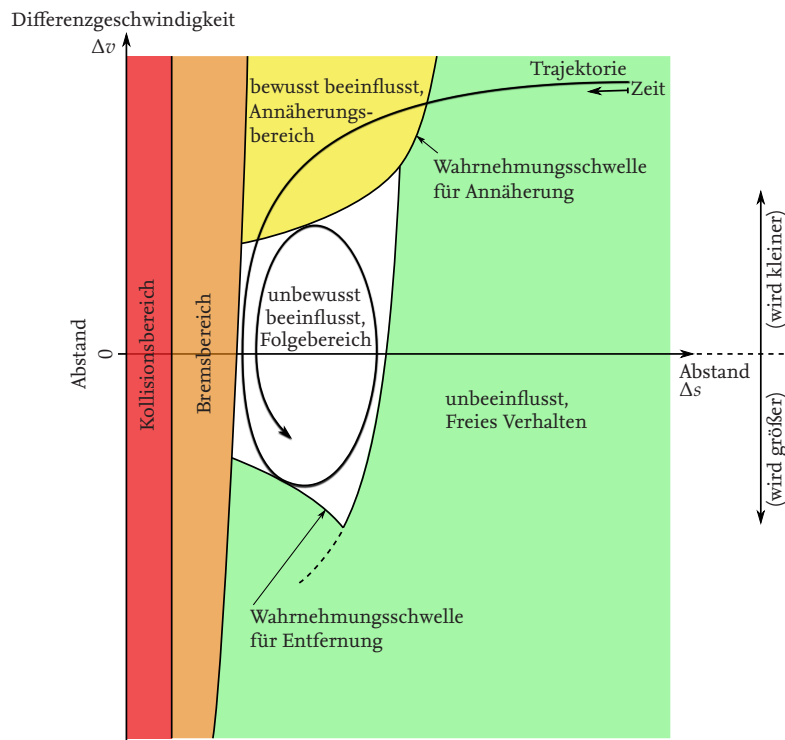


Abbildung 2.8.: Zustände einer Folgefahrt nach Wiedemann [Leutzbach, 1988; PTV, 2011; Wiedemann, 1974]

Zustand bestrebt, die Fahrzeuggeschwindigkeit an seine Wunschgeschwindigkeit anzupassen.

**Annäherungsbereich:** Der Fahrer eines Folgefahrzeugs passt sein Verhalten einem sich nähernden Vorderfahrzeug an. Der Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen verringert sich, so dass auch die Geschwindigkeit des Folgefahrzeugs reduziert werden muss.

**Folgebereich:** Der Fahrer eines Folgefahrzeugs folgt einem Vorderfahrzeug in sicherem Abstand durch unbewusste Anpassung seiner Geschwindigkeit: Bremsen und Beschleunigen. Die unvollkommene Beherrschung eines menschlichen Fahrers über sein Fahrzeug hat ein Pendeln der Geschwindigkeit/-sdifferenz und somit auch des Folgeabstands zur Folge.

**Bremsbereich:** Im Folgebereich können unerwartete Bremsungen des Vorderfahrzeugs oder Fahrstreifenwechsel Dritter eine bewusste Bremsung des Folgefahrzeugs erfordern, um seinen gewünschten Sicherheitsabstand zum (ggf. neuen) Vorderfahrzeug wieder einzuhalten.

Die aus der Abstands- und Geschwindigkeitsregelung resultierende Pendelbewegung der Fahrzeugtrajektorie beim Durchschreiten dieser Zustände wird in der Literatur oft als *close following spiral* bezeichnet [Brackstone und McDonald, 1999]. Für die Wahrnehmungsschwellen wird in [Wiedemann, 1974] eine stochastische Definition und Parametrierung vorgeschlagen. Für weitere Ausführungen und eine detaillierte Modellbeschreibung wird auf die Arbeiten [Olstam und Tapani, 2004; Wiedemann und Reiter, 1992] verwiesen. Das kommerziell erhältliche mikroskopische Verkehrssimulationswerkzeug VISSIM verwendet per Default eine Adaption des Modells von Wiedemann [PTV, 2016a].

Eine weitere Ausprägung von psycho-physischen Fahrzeugfolgmodellen wird in [Fritzsche, 1994] beschrieben, dessen Konzept mit dem von Wiedemann vergleichbar ist. Das Verhalten des Fahrers wird darin in fünf Betriebsbereiche unterteilt. Das Fahrzeugfolgmodell nach Fritzsche findet im Verkehrssimulationswerkzeug PARAMICS Anwendung.

**Zellularautomaten** beschreiben im Kontext der Verkehrsmodellierung ein in [Cremer und Ludwig, 1986] sowie [Schütt, 1990] vorgestelltes Fahrzeugfolgeverhalten. Die Motivation für dessen Entwicklung lag in den hohen Anforderungen an die Rechenleistung, die mit räumlich kontinuierlichen Fahrzeugmodellen einhergehen. Um die Nachbildung umfangreicher Verkehrsszenarien zu ermöglichen, wird ein räumlich diskretes (sog. bitorientiertes) Verkehrsmodell basierend auf Zellularautomaten vorgeschlagen. Der Ansatz wird in [Nagel und Schreckenberg, 1992] aufgegriffen und mit individuellen, stochastischen Fahrzeugattributen erweitert, um dynamische Verkehrsverhalten, wie *Stop and Go-Wellen* oder den *Stau aus dem Nichts*, mit dem Modell der sog. Zellularautomaten realistisch nachzubilden.

Die Grundidee der Modellierung ist Unterteilung der Verkehrsweeinfrastuktur in einen Zellularraum, dessen Elemente jeweils Fahrstreifenabschnitte (Zellen) gleicher Länge repräsentieren. Jede Zelle besitzt eine endliche Nachbarschaft, die aus der Struktur der Verkehrsweeinfrastuktur resultiert. Jede Zelle kann nur durch ein Fahrzeug belegt sein, wobei ein Fahrzeug mehr als nur eine Zelle belegen kann. Der Wert einer belegten Zelle repräsentiert die quantisierte Geschwindigkeit  $v_n$  des belegenden Fahrzeugs  $n$ . Darüber hinaus haben Fahrzeuge individuelle Parameter, bspw. Maximalgeschwindigkeit, -beschleunigung oder Folgeabstand, die jeweils in ganzzahligen Vielfachen der festen Fahrstreifenlänge einer Zelle angegeben und errechnet werden. Die Überföhrungsfunktion, mit der jedes Fahrzeug aus seinem aktuellen Zustand in einen Folgezustand überföhrt wird, ist in Form von vier vereinfachten Regeln definiert und wird in jedem diskreten Zeitschritt für jedes in einer Simulation berücksichtigte Fahrzeug sequenziell durchgeführt [Schreckenberg et al., 1996]:

1. Jedes Fahrzeug beschleunigt mit einer festgelegten Beschleunigung bis dessen Maximalgeschwindigkeit oder die maximal zulässige Geschwindigkeit erreicht ist.
2. Jedes Fahrzeug bremst, um seinen gewünschten Sicherheitsabstand einzuhalten.
3. Gemäß einer gegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilung verringert ein Fahrzeug seine Geschwindigkeit. Diese Variation bildet die Imperfektion von Fahrern nach und erlaubt die Analyse stochastischer Effekte, da die Simulation eines Verkehrsszenarios nicht deterministisch erfolgt.
4. Jedes Fahrzeug  $n$  bewegt sich um  $v_n$  Plätze vor.

Die Mächtigkeit von Zellularautomaten zeigt sich insb. bei der Simulation großer Verkehrsszenarien. Aufgrund des geringen Rechenaufwandes werden sie für die Erstellung kurzfristiger Verkehrsprognosen eingesetzt. In Nordrhein-Westfalen bspw. wird ein Verkehrsmodell basierend auf Zellularautomaten genutzt [Hafstein et al., 2004]. Über Induktionszählschleifen werden Verkehrsinformationen an ein Simulationsmodell übertragen, welches Prognosen über den Verkehrszustand, insb. die Auslastung der Verkehrsweeinfrastuktur, berechnet und die Informationen für Verkehrsteilnehmer öffentlich bereitstellt. Die summierte

Tabelle 2.5.: Übersicht mikroskopischer Fahrzeugfolgemodelle, übernommen aus [Detering, 2011] und erweitert

Modellart	Ausprägung			Auflösung	
	Autor	Quelle	Jahr	zeitlich	räumlich
Stimulus Response	Reuschel	[Reuschel, 1950]	1950	kont.	kont.
	Pipes	[Pipes, 1953]	1953	kont.	kont.
	Chandler/Herman/Montroll	[Chandler et al., 1958]	1958	kont.	kont.
	Gazis/Herman/Rothery	[Gazis et al., 1961]	1961	kont.	kont.
Safety Distance	Kometani/Sasaki	[Kometani und Sasaki, 1958]	1958	diskret	kont.
	Gipps	[Gipps, 1981]	1981	diskret	kont.
	Krauß	[Krauß, 1998]	1998	diskret	kont.
	Treiber/Hennecke/Helbing	[Treiber et al., 2000]	2000	diskret	kont.
Psycho-physisch	Wiedemann	[Wiedemann, 1974]	1974	diskret	kont.
	Fritzsche	[Fritzsche, 1994]	1994	diskret	kont.
Zellularautomaten	Schütt	[Schütt, 1990]	1990	diskret	diskret
	Nagel/Schreckenberg	[Nagel und Schreckenberg, 1992]	1992	diskret	diskret

Länge der darin berücksichtigten Verkehrswege beträgt 12 200 km, in denen der Verkehr (bei einer festen Zellenlänge von 1.5 m) mit über 8 000 000 Zellen modelliert wird. Für eine detaillierte Einführung in die Verkehrssimulation mit Zellularautomaten wird auf die Bücher [Schnieder et al., 2007; Treiber und Kesting, 2010] verwiesen.

Die Anwendung der vorgestellten Fahrzeugfolgemodelle erfordert für eine repräsentative Parametrierung Analysen zu deren Auswirkungen auf makroskopische Verkehrskenngrößen. Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten finden sich in den Arbeiten [Schnieder et al., 2007; Treiber und Kesting, 2010]. Trotz ihrer mehr als 50-jährigen Entwicklung zeigt sich in den aktuellen Arbeiten [Kesting et al., 2010b, 2008; Treiber et al., 2006; Vortisch, 2014; Wagner, 2006], dass die Weiterentwicklung von Fahrzeugfolgmodellen auch heutzutage eine hohe wissenschaftliche Relevanz hat. Einerseits besteht weiterhin das Bestreben die Modelle unter Berücksichtigung sämtlicher Aspekte des menschlichen Verhaltens sowie der Fahrzeugkinematik und -dynamik mit (möglichst wenigen) nachvollziehbaren Parametern realistisch zu beschreiben [Kesting et al., 2010b; Wagner, 2006]. Andererseits fehlt in vielen aktuellen Modellen die Nachbildung des vorausschauenden Verhaltens menschlicher Fahrer [Vortisch, 2014; Wagner et al., 2012], deren Entwicklung, Implementierung und Analyse insb. für die Testfallgenerierung für neuartige Fahrer- und Verkehrsassistenzsysteme sowie deren simulative Validierung erforderlich sind.

Ein großer Anteil der Fahrzeuge im heutigen Stadtverkehr wird von menschlichen Fahrern gesteuert. Um in Verkehrsszenarien den vorherrschenden Verkehr nachzubilden, muss ein Fahrzeugfolgmodell angewendet werden, welches das menschliche Verhalten bei der Fahrzeugführung beschreibt und dabei den Ansatz in SUMO verfolgt, dass Fahrzeugkollisionen ausgeschlossen werden. Zur Modellierung des Fahrzeugfolgeverhaltens wird daher bei der späteren Erstellung von Verkehrsszenarien das Fahrzeugfolgmodell von Krauß angewendet. In Tabelle 2.5 wird eine zusammenfassende Übersicht zu den hier beschriebenen Fahrzeugfolgmodellen und ihren Eigenschaften geboten. Weitere Details über Fahrzeugfolgemodelle finden sich in den Arbeiten [Detering, 2011; Henze, 2004; Schnieder und Schnieder, 2013].

### 2.4.2.3. Fahrstreifenwechselmodelle

Bei der Modellierung des Fahrzeugverhaltens spielen neben der Fahrzeugfolge auch Fahrstreifenwechsel eine wesentliche Rolle. Die Arbeit [Miska et al., 2006a] bietet einen Überblick über die chronologische Entwicklung von Modellen, die sich mit dem Fahrstreifenwechselverhalten auf mikroskopischer Ebene befassen. Weiterführende Details zu verbreiteten Modellen finden sich in [Detering, 2011]. In den folgenden Abschnitten werden relevante Modelle und deren Ansätze vorgestellt.

Bei der Verhaltensmodellierung wird in der Literatur zwischen vier Motivationen für einen Fahrstreifenwechsel unterschieden:

- Mit strategischen Fahrstreifenwechseln zielen Fahrer darauf ab, in vorausschauender Weise eine Fahrspur einzunehmen, auf dem ihnen die Weiterfahrt gemäß ihrer geplanten Route an einem bevorstehenden Knoten ermöglicht wird.
- Taktische Fahrstreifenwechsel hingegen dienen dazu, langsame Folgefahrten zu vermeiden, indem langsamere Vorderfahrzeuge überholt werden.
- Obligatorische Fahrstreifenwechsel sind zur Einhaltung des Rechtsfahrgebotes erforderlich.
- Kooperative Fahrstreifenwechsel werden unternommen, um Fahrzeugen, die einen gewünschten Fahrstreifenwechsel signalisieren, einen Fahrstreifenwechsel zu ermöglichen.

Analog zur Fahrzeugfolge, gliedert sich auch der Prozess des Fahrstreifenwechsels in die drei Teilaufgaben der *Wahrnehmung*, *Entscheidungsfindung* und *Steuerung*. Im Gegensatz zur Fahrzeugfolge, deren Aufgaben von Fahrern nahezu kontinuierlich durchgeführt (und im Rahmen von Simulationen in jedem diskreten Zeitschritt berechnet) werden müssen, erfolgt die Wahl des optimalen Fahrstreifens in wesentlich größeren zeitlichen Abständen. Für einen potenziellen Wechsel werden sowohl der eigene als auch benachbarte Fahrstreifen evaluiert. Dabei werden Lücken und Differenzgeschwindigkeiten zu Vorder- und Folgefahrzeugen in Betracht gezogen.

Ein erstes Modell wird mit [Sparmann, 1978] eingeführt, mit dem das Fahrstreifenwechselverhalten auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen von Bundesautobahnen beschrieben wird. Sparmann betrachtet zwei taktische Motivationen für einen Fahrstreifenwechsel zwischen *Überhol*- und *Fahrspur* (linker und rechter Fahrstreifen bei Rechtsverkehr), die sich bei der Bahnführung ergeben:

1. Um seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen, wechselt der Fahrer eines Fahrzeugs rechtzeitig vor Eintritt eines vorausfahrenden langsameren Fahrzeugs in seinen Sicherheitsabstand auf den linken Fahrstreifen, sofern es der Verkehr auf dem Nachbarfahrstreifen und das Sicherheitsbedürfnis des Fahrers zulassen.
2. Aufgrund des Rechtsfahrgebotes und seiner Bestrebung, die Behinderung von Folgefahrzeugen zu minimieren, wechselt der Fahrer eines Fahrzeugs wieder zurück auf den rechten Fahrstreifen. Diese Entscheidung wird dabei von der Anwesenheit von Vorderfahrzeugen auf dem rechten Fahrstreifen und der Distanz zu diesen sowie der Anzahl von Folgefahrzeugen auf seinem Fahrstreifen beeinflusst.



Sparmann belegt sein theoretisches Modell mit empirischen Analysen. Die Anwendung des Modells setzt voraus, dass im mikroskopisch simulierten Untersuchungsraum ein Rechtsfahrgebot gemäß der Deutschen Straßenverkehrsordnung herrscht. Das Fahrstreifenwechselmodell von Sparmann ist in den Verkehrssimulationswerkzeugen PELOPS [fka, 2016] und VISSIM [PTV, 2016a] implementiert.

Neben einem Fahrzeugfolgmodell wird in [Gipps, 1986] auch ein Verhaltensmodell für den Fahrstreifenwechsel von Fahrzeugen beschrieben. Bei der Fahrstreifenwahl werden in dem Modell sowohl taktische Entscheidungen des Fahrers bei der Bahnführung als auch Entscheidungen der Navigation berücksichtigt, um die Weiterfahrt gemäß einer geplanten Route zu ermöglichen. Hierfür werden drei Betriebszustände eingeführt:

1. In Analogie zum Modell von Sparmann wechselt der Fahrer eines Fahrzeugs zum Überholen auf einen linken Fahrstreifen, sofern er dort mindestens um eine definierte Differenz  $\Delta v_{n,\bar{u}}$  schneller als auf dem aktuellen Fahrstreifen vorankommt und es der übrige Verkehr auf seinem Zielfahrstreifen zulässt. Der Fahrer wechselt zurück auf den rechten Fahrstreifen, wenn er seine Geschwindigkeit dort nicht um mehr als eine definierte Differenz  $\Delta v_{n,z}$  reduzieren muss.
2. Nähert sich ein Fahrzeug einem Knotenpunkt, muss der Fahrer einen Fahrstreifen einnehmen, der ihm die Weiterfahrt am Knoten gemäß seiner geplanten Route ermöglicht. Dazu nimmt der Fahrer den Zielfahrstreifen oder, sofern dieser (wie im Fall einer bevorstehenden Abzweigung auf einen Verzögerungsstreifen) noch nicht existiert, einen benachbarten Fahrstreifen ein.
3. Unmittelbar vor einem Knoten nimmt der Fahrer eines Fahrzeugs seinen Zielfahrstreifen ein. Der Wechsel dorthin hat eine höhere Priorität als das Erreichen der Wunschgeschwindigkeit.

Alle Fahrstreifenwechsel erfordern einen Sicherheitsabstand, der jedoch in Abhängigkeit des aktuellen Betriebszustands und der Dringlichkeit eines Wechsels variiert. Zuletzt vergleicht Gipps das von ihm entwickelte Modell mit erhobenen Messdaten und kalibriert seine Modellparameter dahingehend. Das Fahrstreifenwechselmodell von Gipps findet in den Verkehrssimulationswerkzeugen PELOPS [Diekamp, 1995; fka, 2004, 2016] und MITSIMLab [ITS Lab, 2016] Anwendung.

Zusammen mit einem psycho-physischen Fahrzeugfolgmodell wird in [Fritzsche, 1994] auch ein Fahrstreifenwechselmodell präsentiert, mit dem sich insb. dem Fahrverhalten bei der Sperrung einzelner Fahrstreifen gewidmet wird. Die Dokumentation der zugrundeliegenden Regeln eines Fahrstreifenwechsels sind zwar sehr limitiert, eine Variante dieses Modells findet aber im Verkehrssimulationswerkzeug PARAMICS Anwendung [Pitney Bowes Software, 2016].

Im weiteren Verlauf der 1990er Jahre folgten eine Reihe von Entwicklungen und Ansätzen bei der Modellierung des Fahrstreifenwechselverhaltens. Im Rahmen dieser wird mit [Hunt und Lyons, 1994] ein Ansatz auf der Basis von neuronalen Netzen vorgestellt, mit dem die Entscheidungsfindung von Fahrern beim Fahrstreifenwechsel modelliert wird. In diesem Modell wird die Entscheidung von Fahrern auf Grundlage visueller Muster nachgebildet, die Fahrer in ihrer Umgebung wahrnehmen. In [Yang und Koutsopoulos, 1996] wird erstmals ein Fahrstreifenwechselmodell präsentiert, mit dem auf das kooperative Verhalten

von Fahrern bei Fahrstreifenwechsel eingegangen wird. Darin unterliegt das Verhalten von Fahrern in Folgefahrzeugen einer Toleranz zum Gewähren einer Vorfahrt, in deren Abhängigkeit sie ihren Folgeabstand vergrößern, um Vorderfahrzeugen ein Einfädeln zu ermöglichen: dem sog. *courtesy yielding*. Eine Implementierung dieses Modells findet sich im Verkehrssimulationswerkzeug MITSIMLab [ITS Lab, 2016]. Ein vereinfachtes Verhaltensmodell für die Nutzung in Zellularautomaten wird in [Wagner et al., 1997] vorgestellt, welches den Verkehr auf mehreren Fahrstreifen simuliert und sich nach einer Parameterkalibrierung für die Nachbildung makroskopischer Verkehrskenngrößen eignet.

In [Krajzewicz, 2009] wird das in SUMO implementierte Fahrstreifenwechselmodell beschrieben, welches die Verhaltensheuristiken vieler vorangehender Modelle vereint. Ähnlich wie im Modell von Gipps werden sowohl taktische als auch strategische Entscheidungen eines Fahrers berücksichtigt, um seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen sowie rechtzeitig vor Knotenpunkten das Einordnen in die vorgesehenen Fahrstreifen gemäß einer geplanten Route zu ermöglichen. Darüber hinaus beurteilen Fahrer in regelmäßigen Abständen den Vorteil, den sie durch einen Fahrstreifenwechsel erzielen können, indem sie ihre aktuelle Geschwindigkeit mit der auf dem Nachbarfahrstreifen vergleichen und auf die maximal mögliche Geschwindigkeit auf dem aktuellen Fahrstreifen bei freier Fahrt normieren. Kommt es zu einem Fahrstreifenwechsel, wird auch die Anpassung von Fahrzeuggeschwindigkeiten an die Geschwindigkeit auf dem Zielfahrstreifen berücksichtigt. In Analogie zu dem in [Yang und Koutsopoulos, 1996] vorgestellten Modell, zeigen Fahrer auch bei dem von Krajzewicz ein kooperatives Verhalten, um Vorderfahrzeuge einfädeln zu lassen. Mehr als durch die Freundlichkeit gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern begründet sich dieses Verhalten einerseits durch die Tatsache, dass bevorstehende Fahrstreifenwechsel – nach einer vorhergehenden Evaluierung, z.B. auf Größe der Lücke oder weitere herannahende Fahrzeuge auf dem Überholfahrstreifen – durch den Fahrer des wechselnden Fahrzeugs unabhängig von den Gründen dafür signalisiert werden. Andererseits nehmen Fahrer, die ein Einfädeln von Vorderfahrzeugen gewähren, auch eine Bewertung des optimalen Fahrstreifens für sich selbst vor, so dass entsprechende Manöver oft mit einem Tausch der Fahrstreifen zum Vorteil beider Fahrzeuge einhergehen. Das ursprüngliche Modell aus [Krajzewicz, 2009] wurde im Laufe der Zeit mit dem wachsenden Funktionsumfang von SUMO weiterentwickelt. Die wesentlichen Weiterentwicklungen sind in [Erdmann, 2015] vorgestellt und berücksichtigen u. a. das *Drängelverhalten* bei dringend erforderlichen Fahrstreifenwechseln in kleine Lücken. Sofern nicht anders spezifiziert, nutzen Fahrzeuginstanzen in SUMO das Modell nach Krajzewicz als Default-Fahrstreifenwechselmodell. Der Vorteil dieses Modells gegenüber anderen ist, dass dessen Algorithmen sowie Implementierungen im Quellcode für jeden uneingeschränkt einsehbar sind. Aufgrund der Aktualität und Stabilität bei Verkehrssimulationen in SUMO, wird das Fahrstreifenwechselverhalten bei der späteren Erstellung von Verkehrsszenarien mit dem in [Erdmann, 2015; Krajzewicz, 2009] vorgestellten Modell beschrieben.

Für die Definition von Fahrzeugtypen ist in Abbildung 2.9 die in eNetEditor erforderliche Sequenz dargestellt. Durch Tastatureingabe ‘v’ wird ein Dialogfeld für die Definition von Fahrzeugtypen geöffnet, mit dessen Schließen die Definitionen in eine xml-Datei (mit Dateinamensendung .vtype.xml) zur Nutzung in SUMO exportiert werden. Im Anhang wird unter Abschnitt A.2 ein Minimalbeispiel für die Definition von Fahrzeugtypen in SUMO gezeigt, welches auch



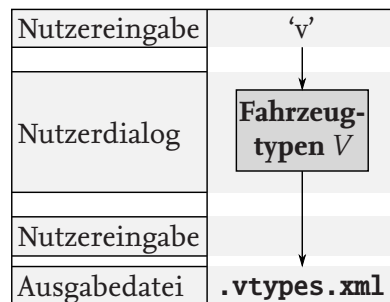


Abbildung 2.9.: Sequenz für die Erstellung von Fahrzeugtypdefinitionen mit eNetEditor

Parameter zur für die Berechnung des Energiebedarfs entsprechend instanziierten Fahrzeugobjekte berücksichtigt. Eine detaillierte Beschreibung dieses Modells findet sich unter Abschnitt 4.2.

### 2.4.3. Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsnachfrage ist das Resultat des Mobilitätsbedarfs, der sich aus den Bedürfnissen individueller Verkehrsteilnehmer nach Ortsveränderung ausdrückt [Steierwald et al., 2005]. Für die Konkretisierung einer Verkehrsnachfrage wird vom betrachteten Nutzer der Zustand des Verkehrssystems ausgewertet. Die Nutzer sowie die verschiedenen Betreiber eines Verkehrssystems treffen dabei Entscheidung im Kontext menschlicher, gesellschaftlicher, politischer, wissenschaftlicher, wirtschaftlicher, umweltrelevanter und technischer Einflussgrößen [Schnieder und Schnieder, 2013]. Jede konkrete Ausprägung der Verkehrsnachfrage kann durch die Wahl der Verkehrsmittel, der Verkehrsmodi, der Route sowie des Abfahrtszeitpunktes beschrieben werden. Darüber hinaus existiert auch ein Mobilitätsbedarf, der nach einer Abwägung nicht in einer Verkehrsnachfrage resultiert, weil er aufgrund des aktuellen Verkehrszustands als unwirtschaftlich erachtet wird und daher nicht angetreten wird.

Während Verkehrsmengen als Resultat der Verkehrsnachfrage in Form von Verkehrszählungen direkt gemessen werden können, muss der Mobilitätsbedarf in Form stichprobenartiger Umfragen ermittelt werden. Erste Modelle für die Entscheidungsfindung bei ihrer Verkehrsmittelwahl werden in [Warner, 1961] als binomiale Entscheidungen eingeführt und finden für die Schätzung des Mobilitätsbedarfs Anwendung. Zur Modellierung diskreter, *multinomialer* Entscheidungen wird mit [McFadden, 1974] die sog. *logit*-Funktion<sup>(2)</sup> eingeführt, die sich zeitnah als Grundmodell für die Entscheidungsfindung insb. bei der Wahl von Verkehrsmitteln und -moden etabliert hat [Forinash und Koppelman, 1993; Greene et al., 2006; Mandel et al., 1997; Train, 1978]. Für weiterführende Details über diskrete Entscheidungsmodellierung im Verkehr wird auf das Handbuch [Ben-Akiva und Bierlaire, 1999] verwiesen.

Um den vorherrschenden Verkehr in einem Untersuchungsraum simulativ nachzubilden, wird bei der Instanziierung von Verkehrsmitteln die Verkehrsnachfrage meist aus verfügbaren Verkehrsmessungen abgeschätzt [Antoniou et al., 2006; Parry und Hazelton, 2012]. Dabei hat die Routenbildung einen wesentlichen Einfluss auf die Repräsentativität und Realitätsnähe eines resultierenden Szenarios. Dieser Abschnitt befasst sich daher mit der Modellierung

<sup>(2)</sup>Für seine Arbeiten an der Analyse diskreter Entscheidungen erhielt Daniel McFadden 2000 zusammen mit James Heckman den Preis für Wirtschaftswissenschaften der schwedischen Reichsbank im Gedenken an Alfred Nobel.

der Verkehrsnachfrage für mikroskopische Verkehrssimulationen und stellt einige etablierte Methoden für die Routenbildung vor.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Verkehrsnachfrage von Straßenfahrzeugen betrachtet und die Modellbildung darauf begrenzt. Bei der Modellierung der Verkehrsnachfrage für Fahrzeuginstanzen wird in SUMO zwischen Fahrten (engl. und in SUMO: trips) und Routen (engl. und in SUMO: routes) unterschieden, die einzelnen Fahrzeugobjekten zugewiesen werden. Während Fahrten nur durch einen Anfangs- (Quelle) und Endknoten (Ziel) definiert sind, stellt eine Route eine konkrete Realisierung einer Fahrt dar, bestehend aus einer festgelegten Kantenfolge. Nach Definition zu betrachtender Fahrzeugtypen stehen zur Modellierung der Verkehrsnachfrage und Instanziierung von Fahrzeugobjekten drei Möglichkeiten für deren Routenbildung zur Verfügung:

- Im seltenen Fall, dass die Routen aller Fahrzeuge in einem Untersuchungsraum bekannt sind, können den simulierten Verkehrsmitteln ihre Fahrzeugrouten manuell zugewiesen werden.
- Sind makroskopische Verkehrskenngrößen aus Messungen (z. B. aus Induktionszählschleifen an Kanten oder Kameras an Knoten stammend) oder aus Zählungen bekannt, kann eine probabilistische Routenbildung für die simulierten Verkehrsmittel erfolgen.
- Sind die Fahrzeugfahrten (bspw. aus Umfragen) in Form von Quellen, Zielen und Abfahrtzeitpunkt bekannt, sog. Quelle-Ziel-Matrizen, können konkrete Routen mit Methoden der Optimierung gebildet werden, die bspw. die Fahrtdauer, Strecke oder den Energiebedarf minimieren.

In den folgenden Abschnitten werden die genannten Methoden der Routenbildung für simulierte Verkehrsmittel beschrieben.

#### **2.4.3.1. Manuelle Routenbildung**

Bei der manuellen Routenbildung muss für jedes instanziierte Fahrzeugobjekt individuell eine Route festgelegt werden. Neben der Testfallgenerierung ist die manuelle Routenbildung besonders bei der Instanziierung von Fahrzeugen mit wiederkehrenden Routen relevant, wie z. B. bei Fahrzeugen des ÖPNV. Hierfür unterstützt SUMO die Instanziierung von Fahrzeugflüssen mit wiederkehrenden Routen. Neben der festen Route, dem Fahrzeugtyp des zu instanziiierenden Fahrzeugs und des Betrachtungszeitraums, muss entweder ein Intervall für zeitlich gleichverteilte Fahrzeuginstanzen oder eine gleichverteilte Wahrscheinlichkeit spezifiziert werden. Sind in der Definition der Verkehrsinfrastruktur Haltestellen beschrieben, können in einer Fahrzeuginstanziierung Halte an Punkten mit einer festen Dauer spezifiziert werden. Im Anhang finden sich unter Abschnitt A.3.1 beispielhafte Instanziierungen für Fahrzeuge mit manuell gebildeten Routen.

#### **2.4.3.2. Probabilistische Routenbildung**

Grundlage der probabilistischen Routenbildung für Fahrzeuginstanzen sind Verkehrsmessungen. Je nach Art der verfügbaren Daten, bietet SUMO zwei Router, um Fahrzeuginstanzen mit gegebenem Startpunkt eine Route zuzuweisen: DFROUTER und JTRROUTER. Diese werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

**DFROUTER (Detector-Flows-Router)** nimmt eine probabilistische Schätzung von Fahrzeugrouten im betrachteten Verkehrssystem vor, die auf Querschnittsmessungen über die Verkehrsstärke auf Fahrstreifen basieren. Es wird dabei zwischen zwei Fahrzeugtypen unterschieden: PKW und LKW. Diese repräsentieren entweder jeweils das Verhalten eines durchschnittlichen Personen- und Lastkraftwagens im Untersuchungsraum oder eine Verteilung von Fahrzeugtypen. In beiden Fällen müssen sie unter Nutzung von DFROUTER definiert sein (eine beispielhafte Definition einer Fahrzeugtypverteilung befindet sich im Anhang unter Abschnitt A.2). Folgende Definitionen sind für die Routenbildung mit DFROUTER erforderlich:

**Detektor-Definitionen** legen die Positionen der erhebenden Messeinrichtungen auf Kanten eines Netzes fest. eNetEditor erlaubt die automatische Generierung dieser Definitionen, indem einer Kante das Attribut `numVehs` sowie ein Zahlenwert für die Anzahl der gemessenen Fahrzeuge pro Tag zugewiesen wird. Eine beispielhafte Detektor-Definition für DFROUTER findet sich im Anhang unter Abschnitt A.3.2.

**Fahrzeugzähldaten** beinhalten pro Detektor und Intervall aggregierte Informationen über die Verkehrsstärke und die Durchschnittsgeschwindigkeit, getrennt nach Fahrzeugtyp PKW und LKW. Für die weitere Verarbeitung durch DFROUTER müssen die Daten in dem Format gegeben sein, welches in Listing A.14 anhand einer beispielhaften Definition gezeigt wird. In eNetEditor können Detektordaten synthetisch aus dem Wert des Attributs `numVehs` erzeugt werden. Fahrzeugflüsse werden entsprechend einer von Nutzern zu definierenden Tagesganglinie in festzulegenden Intervallen eines beliebigen Zeitraums verteilt. In eNetEditor ist dazu die in [FGSV, 2001] (Abbildung 2-4) dokumentierte Tagesganglinie *TGw2West* vordefiniert, kann jedoch vom Anwender beliebig angepasst werden. Das erforderliche Format dieser Zähldaten wird im Anhang unter Abschnitt A.3.3 anhand eines Beispiels verdeutlicht.

Mit diesen Definitionen ermittelt DFROUTER eintretende Fahrzeugflüsse im Untersuchungsraum. Für jedes dieser Fahrzeuge wird nachfolgend eine Route iterativ entlang der passierten Knoten berechnet. An jedem dieser Knoten wird die nächste zu wählende Kante aus den Austrittsverhältnissen von Fahrzeugflüssen probabilistisch ermittelt. Die Wahrscheinlichkeit  $p_i(j)$ , dass ein Fahrzeug am Knoten  $i$  die Folgekante  $j \in {}^iK_{f,j}$  wählt, errechnet sich aus dem Quotient des Fahrzeugflusses  ${}^iq_j$  auf Kante  $j$  und der summierten ausgehenden Flüsse  $\sum_j {}^iq_j$ :

$$p_i(j) = \frac{{}^iq_j}{\sum_j {}^iq_j} \quad (2.21)$$

Diese Berechnungsvorschrift wird in Abbildung 2.10 anhand eines Beispiels veranschaulicht. Diese Berechnungen werden für jedes Fahrzeug durchgeführt, bis eine ausgehende Kante aus dem Untersuchungsraum heraus erreicht wird. Die für die Berechnung erforderlichen ausgehenden Fahrzeugflüsse an den Knoten werden aus den gegebenen Detektordaten entnommen. Fahrzeuge können anschließend mit den jeweils ermittelten Routen instanziiert werden.

Der Vorteil bei der Nutzung von DFROUTER ist, dass Daten von Induktionszählschleifen häufig vorliegen bzw. verhältnismäßig einfach zu beschaffen sind. Ist dies nicht der Fall, sind auch eigene

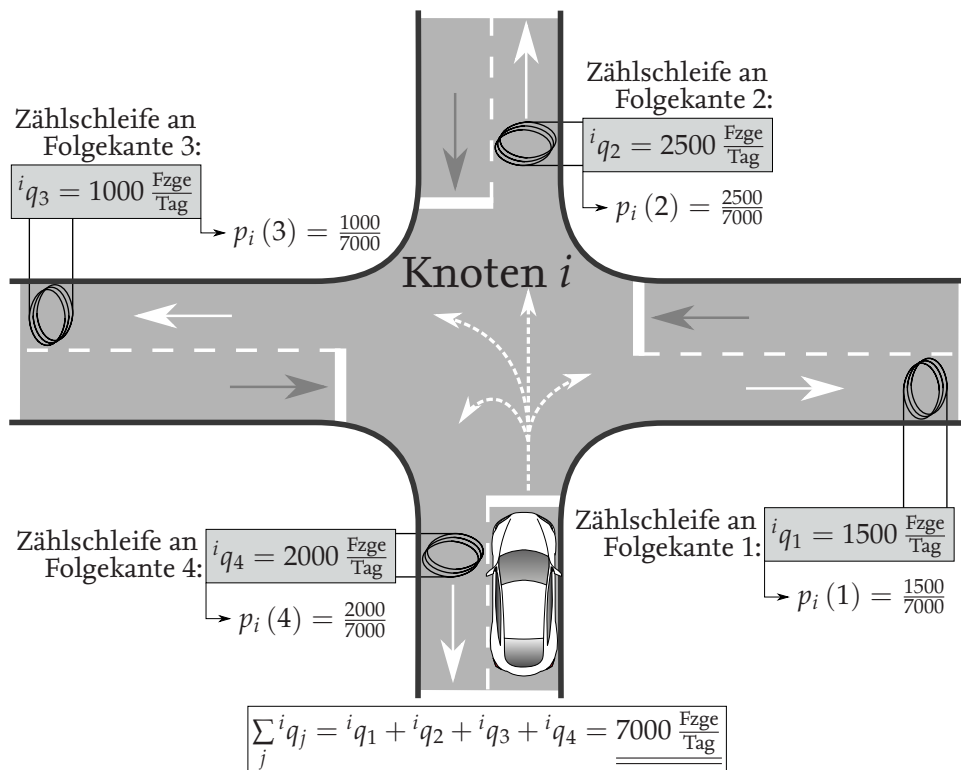


Abbildung 2.10.: Beispielhaftes Kreuzungsszenario am Knoten  $i$  mit Veranschaulichung der Berechnung von Abbiegewahrscheinlichkeiten bei der Routenbildung mit DFROUTER

Erhebungen verhältnismäßig einfach möglich. Der Nachteil hingegen liegt darin, dass für jede Kante des betrachteten Verkehrsnetzes fahrstreifenspezifische Detektordaten vorliegen müssen. Darüber hinaus spiegelt die beschriebene Schätzung der Abbiegewahrscheinlichkeiten nur in den seltensten Fällen die wahre Zusammensetzung eines ausgehenden Flusses an einem Knoten wider. Dadurch, dass alle für DFROUTER erforderlichen Daten als Kanten- oder Fahrstreifenattribute abgelegt werden können, sind in eNetEditor keine zusätzlichen Datenstrukturen erforderlich. Sofern in eNetEditor alle zu berücksichtigenden Kanten mit dem Attribut numVehs und einem Wert spezifiziert sind, werden durch eine Tastatureingabe 'd' alle erforderlichen Definitionsdateien erzeugt und diese durch einen entsprechenden Aufruf an DFROUTER übergeben. Im Anhang wird unter Abschnitt A.3.2 an einem Beispiel die zu verwendende Syntax für die Routenbildung mit DFROUTER gezeigt.

**JTRROUTER (Junctions-Turn-Ratios-Router)** bietet eine weitere Möglichkeit für die probabilistische Routenbildung. Folgende Informationen bilden die Datengrundlage und müssen als Definitionen an JTRROUTER übergeben werden:

**Fahrzeugflüsse** definieren die Quellflüsse an allen zu berücksichtigenden (insb. jedoch an eintretenden) Kanten eines Untersuchungsraums.

**Abbiegewahrscheinlichkeiten** von Fahrzeugen an Knoten bilden die probabilistische Basis für die Routenbildung. Für deren Ermittlung sind weitaus aufwendigere Verkehrszählungen erforderlich als für Querschnittsmessungen, da jeder eingehende Fahrzeugfluss in einen Knoten hinsichtlich seiner Abbiegewahrscheinlichkeiten auf Folgekanten individuell betrachtet werden muss. Zählungen dieser Art werden oft mithilfe von Kameras umgesetzt (wie im Beispiel des vom DLR durchgeführten Forschungsprojekts AIM [Schnieder und Lemmer, 2014a,b]), die eine Ansicht ausgestatteter Kreuzungen von oben ermöglichen und aus denen über Algorithmen der Bildverarbeitung und Objekterkennung die erforderlichen Messdaten extrahiert werden können.

JTRROUTER ist somit in der Lage, die Verkehrsnachfrage in einem weitaus repräsentativeren Umfang zu modellieren. Fahrzeugflüsse auf ausgehenden Kanten eines Knotens setzen sich anteilig entsprechend der jeweils definierten Abbiegewahrscheinlichkeiten aus den eingehenden Fahrzeugflüssen zusammen. Die Berechnungen dafür werden wie bei JTRROUTER iterativ für jedes Fahrzeug durchgeführt. Die Bildung einer Fahrzeugroute wird beendet, sobald eine als Zielkante definierte oder eine austretende Kante aus dem Untersuchungsraum erreicht ist.

Für die Definition von Fahrzeugflüssen ist in eNetEditor eine 2-dimensionale Matrix  $F$  vom Datentyp Array vorgesehen:

$$F^{n \times 8} = \left[ f_{i,k} \right], \text{ mit } \dots \quad (2.22)$$

Flussindex  $i = 1 \dots n$ ,

Attributindex  $k = 1 \dots 18$  und

Anzahl der Flussdefinitionen  $n$ .

Jedes Element  $f_i$  beinhaltet alle erforderlichen Parameter einer Fahrzeugflussdefinition:

$$\underline{f}_i = \left[ {}^F d_i \quad {}^F t_{s,i} \quad {}^F t_{e,i} \quad {}^F e_i \quad {}^F V_i \quad {}^F T_i \quad {}^F l_i \quad {}^F v_i \right], \text{ mit } \dots \quad (2.23)$$

Bezeichnung der Flussdefinition $\underline{f}_i$	${}^F d_i,$
Start des Betrachtungszeitraums von Flussdefinition $\underline{f}_i$	${}^F t_{s,i},$
Ende des Betrachtungszeitraums von Flussdefinition $\underline{f}_i$	${}^F t_{e,i},$
Quellkante der Flussdefinition $\underline{f}_i$	${}^F e_i,$
Anzahl über Betrachtungszeitraum gleichverteilter Fahrzeuge in Flussdefinition $\underline{f}_i$	${}^F V_i,$
Fahrzeugtyp in Flussdefinition $\underline{f}_i$	${}^F T_i,$
Anfangsfahrstreifen von Fahrzeugen der Flussdefinition $\underline{f}_i$	${}^F l_i$ und
Anfangsgeschwindigkeit von Fahrzeugen der Flussdefinition $\underline{f}_i$	${}^F v_i.$

Liegen eNetEditor die Definitionen von aggregierten Querschnittsmesswerten und Tagesganglinien in Kantenattributen vor, erfolgt bei der Routenbildung mit JTRROUTER eine automatische Definition aller in den Untersuchungsraum eintretenden Flüsse. Dazu wird die Menge aller in den Untersuchungsraum eingehenden Kanten mit der Gleichung 2.24 aus der Adjazenzmatrix ermittelt  $A_{\text{adj}} = [e_{i,j,1}]$ :

$$\mathcal{E}_{\text{ein}} := \{e_{i,j,1} \mid \forall i, j \in [0, n] : e_{i,j,1} \neq 0 \wedge e_{j,i,1} = 0\}. \quad (2.24)$$

Alle darüber hinaus zu betrachtenden Fahrzeugquellflüsse müssen manuell in eNetEditor definiert werden, damit diese in die Variable  $F$  aufgenommen werden. Das dafür vorgesehene Dialogfeld kann durch die Tastatureingabe ‘f’ aufgerufen werden, mit dessen Schließen die Fahrzeugflussdefinitionen in eine xml-Datei (mit Dateinamensendung .flows.xml) exportiert werden. Ein Beispiel der zu verwendenden Syntax bei der Definition von Fahrzeugflüssen findet sich im Anhang unter Abschnitt A.3.3 in Listing A.16.

Zusätzlich zu Fahrzeugflüssen erfordert die probabilistische Routenbildung mit JTRROUTER die Definition von Abbiegewahrscheinlichkeiten an Knoten. Das Konzept für die hierfür erforderliche Datenstruktur ähnelt dem der Fahrstreifenverbindungen an Knoten (siehe Unterabschnitt *Fahrstreifenverbindungen an Knoten* in Abschnitt 2.4.1). Hauptsächlichster Unterschied besteht darin, dass Fahrstreifenverbindungen jeweils mit einem ein- und ausgehenden *Fahrstreifen* beschrieben werden, wohingegen Abbiegewahrscheinlichkeiten jeweils durch eine ein- und ausgehende *Kante* zu definieren sind. Jede Kante wird wiederum durch einen Anfangs- und Endknoten beschrieben, wobei der Endknoten einer eingehenden Kante dem Anfangsknoten einer ausgehenden Kante entspricht. Somit ist für die Definition von Abbiegewahrscheinlichkeiten in eNetEditor eine 3-dimensionale Matrix  $\mathcal{J}$  vom Datentyp Array vorgesehen:

$$\mathcal{J}^{n \times n \times n} = [J_{i,j,k}], \text{ mit } \dots \quad (2.25)$$

Quellknoten der eingehenden Kante	$i = 1 \dots n,$
Ziel-/Quellknoten der ein-/ausgehenden Kante	$j = 1 \dots n,$
Zielknoten der ausgehenden Kante	$k = 1 \dots n,$
Anzahl der Knoten im betrachteten Verkehrsnetz	$n$ und
der jeweiligen Abbiegewahrscheinlichkeit	$J_{i,j,k} = [0, 1].$

Die Größe der Variable  $\mathcal{J}$  steigt kubisch mit der Anzahl von definierten Knoten  $n$ . Um den erforderlichen Speicherbedarf für die Variable  $\mathcal{J}$  zu senken, kann diese aufgrund der vielen



Nullelemente als dünnbesetzte Matrix deklariert werden. Darüber hinaus muss für den Erhalt der Fahrzeugflüsse an Knoten die Summe der Abbiegewahrscheinlichkeiten eines eingehenden Fahrzeugflusses 1 betragen:

$$\sum_k J_{i,j,k} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } e_{i,j,1} \neq 0 \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (2.26)$$

Zur Definition von Abbiegewahrscheinlichkeiten wird mit der Tastatureingabe 'c' ein Dialogfeld aufgerufen werden. Mit dessen Schließen werden die Definitionen der Abbiegewahrscheinlichkeiten in eine xml-Datei (mit Dateinamensendung .turns.xml) exportiert. Die zu verwendende Syntax bei der Definition von Abbiegewahrscheinlichkeiten wird im Anhang unter Abschnitt A.3.3 an einem Beispiel in Listing A.17 verdeutlicht. Für die Erstellung eines Verkehrsszenarios, in dem Fahrzeugrouten mit JTRROUTER ermittelt

Verschiedene Optionen erlauben Nutzern sowohl bei DFROUTER als auch JTRROUTER die Einflussnahme auf die Routenbildung, um Schleifen in Routen zu vermeiden, das Wenden von Fahrzeugen an Knoten (sog. U-Turns) zu unterbinden oder die Routenbildung nach Erreichen einer festgelegten maximalen Anzahl von Kanten abubrechen. Liegen Definitionsdateien für Fahrzeugflüsse und Abbiegewahrscheinlichkeiten vor, werden diese über die Tastatureingabe 'j' durch einen entsprechenden Aufruf an JTRROUTER übergeben. Die zu verwendende Syntax für den Aufruf von JTRROUTER ist im Anhang unter Abschnitt A.3.3 beispielhaft in Listing A.18 gezeigt.

#### 2.4.3.3. Routenbildung auf Basis von Quelle-Ziel-Beziehungen mit MAROUTER

Die weitaus präziseste Methode für die repräsentative Nachbildung des vorherrschenden Verkehrs in einem Untersuchungsraum bietet die Nutzung von Quelle-Ziel-Beziehungen. Jedes Fahrzeug wird mit einer Fahrt instanziiert und beginnt seine Route an einer *Quelle* mit einem konkreten *Ziel*. Die letztlich zu wählende Kantenfolge kann hinsichtlich verschiedener Gütemaße optimiert werden und ergibt sich oft aus der Ermittlung der kürzesten Route, der geringsten zu erwartenden Fahrtdauer oder dem niedrigsten Kraftstoffbedarf, durch Nutzung des Dijkstra- [Dijkstra, 1959] oder A\*-Algorithmus [Hart et al., 1968].

Quelle-Ziel-Beziehungen werden meist in Form sog. Quelle-Ziel-Matrizen definiert (engl.: origin destination matrix, kurz: O/D matrix). Dazu werden in einem Untersuchungsraum relevante Verkehrsbezirke eingeführt, die jeweils aggregiert als Quelle oder Ziel einer Fahrt dienen können. Ist die Anzahl von Quellen und Zielen gleich, ergibt sich bei einer Anzahl von  $n$  Quell- und Zielbezirken eine quadratische Matrix  $F$  mit  $n \times n$  Elementen. Jedes ihrer Elemente repräsentiert die Anzahl der Fahrten von Quelle  $i$  zum Ziel  $j$  und wird mit der Variable  $f_{i,j}$  attribuiert. Die Summe einer Zeile  $i$  ergibt jeweils die Anzahl aller Fahrten  $O_i$ , die im Verkehrsbezirk  $i$  beginnen (Quelle). Spaltensummen  $D_j$  hingegen ergeben jeweils die Anzahl der Fahrten, die im Verkehrsbezirk  $j$  enden (Ziel). Die entsprechende Struktur ist in Abbildung 2.11 anhand eines beispielhaften Verkehrsnetzes mit fünf Bezirken dargestellt.

Für die Erstellung dieser Quelle-Ziel-Matrizen stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung: Entweder wird auf Grundlage von Umfragen sowie sozialer oder städtebaulicher Struktur eines Untersuchungsraums eine eigene Erhebung durchgeführt oder es wird diese aus bestehenden oder zu erhebenden Verkehrsmessungen geschätzt. Beide Ansätze werden in den folgenden Abschnitten kurz erläutert.



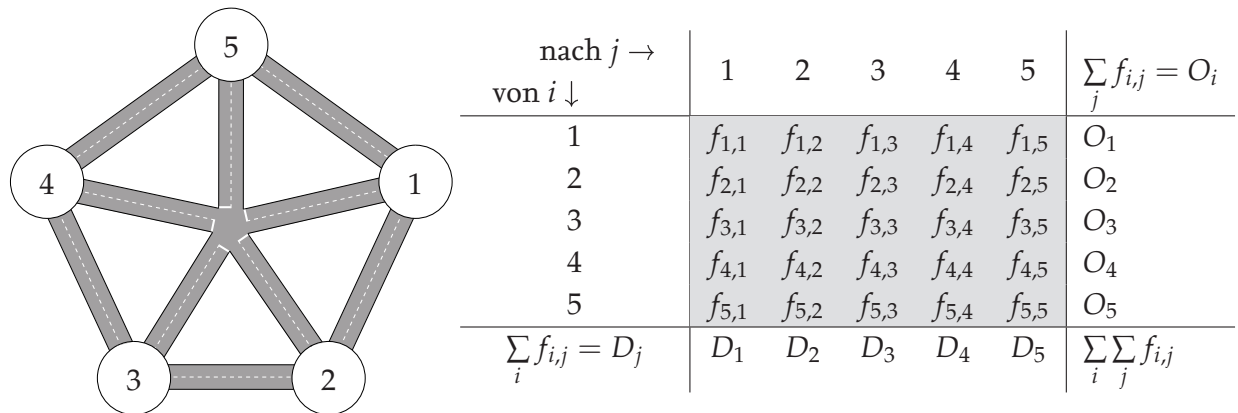


Abbildung 2.11.: Beispielhaftes Verkehrsnetz mit fünf Verkehrsbezirken (links) und die zugehörige Quelle-Ziel-Matrix (rechts); die einzelnen Elemente  $f_{i,j}$  der Quelle-Ziel-Matrix  $F = [f_{i,j}]$  repräsentieren die Anzahl der Fahrten von Quelle  $i$  zum Ziel  $j$

### Erhebung und manuelle Definition von Quelle-Ziel-Matrizen

Für die Erhebung repräsentativer Quelle-Ziel-Matrizen werden häufig Nutzerbefragungen oder demografische Analysen in einem Untersuchungsraum durchgeführt. Zur Modellierung von synthetischen Populationen kann für SUMO die Applikation ACTIVITYGEN genutzt werden [DLR, 2010]. Grundlage für die Erstellung einer Verkehrsnachfrage in Form von Quelle-Ziel-Matrizen bildet die sog. Statistik-Datei. Diese beinhaltet neben allgemeinen demografischen Angaben über die betrachtete Population (wie Einwohnerzahl, Anzahl der Haushalte, Motorisierungsgrad, Arbeitslosenquote, Altersverteilung) auch die räumliche Verteilung konkreter Quellen und Ziele (Haushalte, Arbeitsstätten, Schulen) unter Berücksichtigung ihrer spezifischen Parameter (Kapazität, Öffnungszeiten). Für die manuelle, jedoch grafisch unterstützte Erstellung dieser Statistik-Datei auf Grundlage einer bestehenden Definition der Verkehrsweginfrastruktur kann das Softwarewerkzeug *SUMO Traffic Modeler* genutzt werden, welches in [Papaleontiou, 2008] näher beschrieben wird. Dessen Entwicklung wird derzeit nicht weiter gepflegt, ist aber aufgrund des stabilen Entwicklungszustands und seiner umfangreichen Funktionalitäten dennoch ein aktueller Bestandteil der SUMO-Distribution.

### Schätzung einer Quelle-Ziel-Matrix aus Verkehrsmessungen

Die vollständige Erhebung von Quelle-Ziel-Matrizen durch Umfragen geht mit Ungenauigkeiten einher. Die Erhebung mit geeigneter Sensorik hingegen ist mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand verbunden. Da jedoch Querschnittsmessungen von Untersuchungsräumen in vielen Fällen bereits vorliegen (bzw. verhältnismäßig einfach zu ermitteln sind), gibt es eine Reihe an Methoden, die es für beliebige Untersuchungsräume ermöglichen, aus diesen Daten eine Schätzung der Quelle-Ziel-Matrix vorzunehmen. Eine Übersicht wird in [Rohde, 2007] geboten und in den folgenden Abschnitten kurz zusammengefasst. Grundlage hierfür ist die Einführung einer sog. Anteilsmatrix  $P$ , mit der die Umlegung der Fahrzeugrouten (resultierend aus der Quelle-Ziel-Matrix  $F$ ) auf einzelne Kanten  $e_{i,j}$  (von insgesamt  $m$  Kanten) des Netzes entsprechend des Gleichungssystems 2.27 realisiert wird. Um dieses Gleichungssystem in zwei Dimensionen darzustellen, werden die Spalten der ursprünglichen Quelle-Ziel-Matrix  $F$  untereinander in einen

Vektor  $\underline{f'}$  übertragen:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} p_{1,1,1} & p_{1,1,2} & \cdots & p_{1,1,n} & p_{1,2,1} & p_{1,2,2} & \cdots & p_{1,n,n} \\ p_{2,1,1} & p_{2,1,2} & \cdots & p_{2,1,n} & p_{2,2,1} & p_{2,2,2} & \cdots & p_{2,n,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m,1,1} & p_{m,1,2} & \cdots & p_{m,1,n} & p_{m,2,1} & p_{m,2,2} & \cdots & p_{m,n,n} \end{bmatrix}}_P \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} f_{1,1} \\ f_{1,2} \\ \vdots \\ f_{1,n} \\ f_{2,1} \\ f_{2,2} \\ \vdots \\ f_{n,n} \end{bmatrix}}_{\underline{f'}} = \underbrace{\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_m \end{bmatrix}}_{\underline{q}} \quad (2.27)$$

Die gemessene Verkehrsstärke  $q_a$  auf einer Kante  $a$  setzt sich gemäß Gleichung 2.28 aus der Summe aller möglichen Anteile von Fahrten  $f_{i,j}$  zusammen, die die Kante  $a$  nutzen:

$$q_a = \sum_i \sum_j p_{a,i,j} f_{i,j} \quad (2.28)$$

Bei  $m$  Gleichungen und  $n \times n$  freien Parametern für die Quelle-Ziel-Matrix sowie  $m \times n \times n$  freien Parametern für die Anteilsmatrix ist dieses Gleichungssystem stark unterbestimmt. Um mit zusätzlichen Informationen den Suchraum zur Schätzung dieser Parameter einzugrenzen, wird in [Abrahamsson, 1998] zwischen drei grundlegenden Ansätzen unterschieden:

- Die Methode der *Entropiemaximierung* (oder Informationsminimierung) setzt eine (bestmöglich geschätzte) a-priori Quelle-Ziel-Matrix voraus. Bei der Entropiemaximierung wird versucht, dieser Matrix möglichst wenig Informationen hinzuzufügen und die Bedingungen der gemessenen Verkehrsstärken einzuhalten [van Zuylen und Willumsen, 1980].
- Auch die Methoden der *statistischen Deduktion* setzen eine a-priori Quelle-Ziel-Matrix voraus, nehmen jedoch an, dass diese sowie auch die Messungen der Verkehrsstärken  $q_a$  und die Anteilsmatrix  $P$  nur Stichproben einer Grundgesamtheit darstellen und einer stochastischen Verteilung unterliegen. Für eine Schätzung bzw. Korrektur der Quelle-Ziel-Matrix fanden in der Vergangenheit die Methoden der Bayes'schen Statistik [Maher, 1983], der kleinsten Quadrate [Bell, 1991; Cascetta, 1984] sowie des Maximum-Likelihoods [Spiess, 1987] Anwendung. Sowohl bei der Methode der Entropiemaximierung als auch bei der statistischen Deduktion erfolgt die Optimierung der freien Parameter iterativ in einem zwei-Schritt-Verfahren. Dabei wird zunächst eine Korrektur der a-priori geschätzten Quelle-Ziel-Matrix  $F$  und anschließend eine Optimierung der Anteilsmatrix  $P$  vorgenommen. Diese Schritte werden so lange iterativ durchgeführt, bis die beobachteten Verkehrsstärken  $\underline{q}$  hinreichend gut angenähert werden können.
- In den Arbeiten [LeBlanc und Farhangian, 1982; Spiess, 1990; Yang et al., 1992] kam für die Optimierung der Anteilsmatrix  $P$  das *Gradientenverfahren* zur Anwendung.

Für weiterführende Details über die Schätzung von Quelle-Ziel-Matrizen und ihrer Optimierung wird an dieser Stelle auf [Wang, 2008] und [Abrahamsson, 1998] verwiesen.

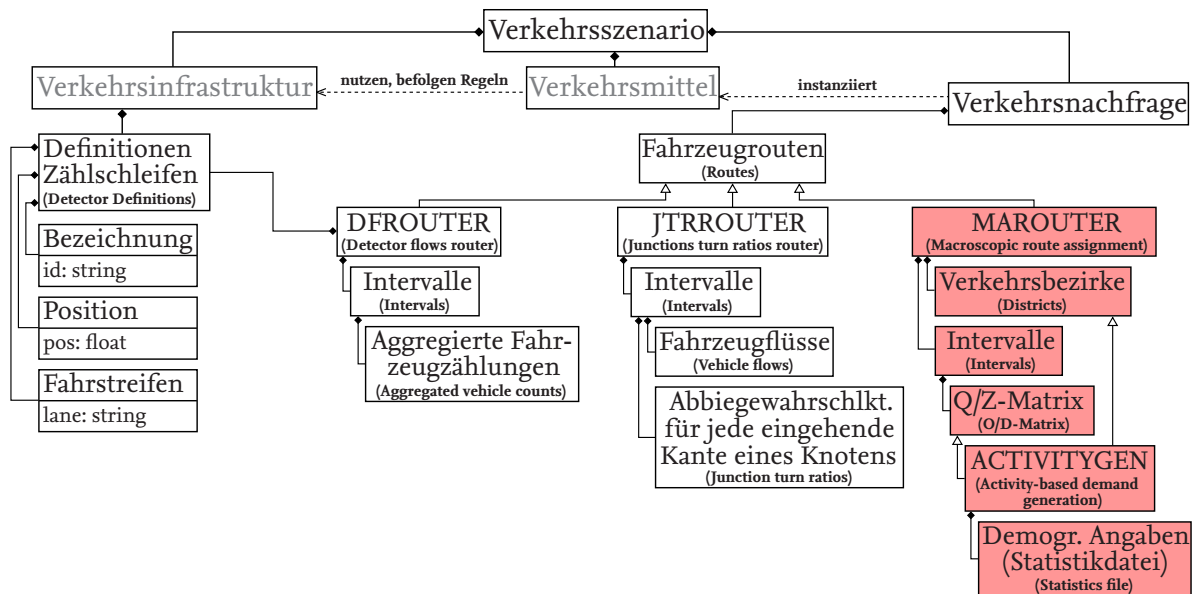


Abbildung 2.12.: Konstituenten zur Modellierung von Verkehrsnachfrage für mikroskopische Verkehrssimulationen in Form eines UML-Klassendiagramms

Ist die Quelle-Ziel-Matrix eines Untersuchungsraums bekannt, kann MAROUTER zur Routenbildung für Fahrzeuginstanzen genutzt werden. Sofern der Routing-Algorithmus mit der Option `--routing-algorithm` nicht anders spezifiziert wird, erfolgt die Berechnung optimaler Routen aus der Quelle-Ziel-Matrix mithilfe des Dijkstra-Algorithmus. Alternativ zur Kantlänge kann MAROUTER bei der Routenbildung beliebig definierbare Kantengewichte nutzen. Diese müssen im Modell der Verkehrswegeinfrastruktur definiert werden. Durch die Werkzeugunterstützung bei der Definition von Verkehrsnachfrage mit MAROUTER, wurde auf eine Implementierung dieser Funktionalitäten bei eNetEditor verzichtet. In Abbildung 2.12 wird zusammenfassend die Relationierung der vorgestellten Modelle für die Generierung von Verkehrsnachfrage mithilfe der Router-Applikationen DFROUTER, JTRROUTER und MAROUTER in Form eines UML-Klassendiagramms veranschaulicht. Für die Instanziierung von Verkehrsmitteln muss in eNetEditor eine der in Abbildung 2.13 dargestellten Sequenzen durchlaufen werden. Die Definition von Fahrzeuginstanzen (inkl. ihrer Routen) erfolgt für SUMO in einer xml-Datei (mit Dateinamensendung `.rou.xml` oder `.veh.xml`). Sie bilden mit der Netz- und den Fahrzeugtypdefinitionen die erforderlichen Konstituenten eines Verkehrsszenarios. Optional können auch Halte- und Ladestellendefinitionen gegeben werden.

Es wurden in diesem Abschnitt die grundlegenden Konstituenten mikroskopisch mit SUMO zu simulierender Verkehrsszenarien beschrieben. Dazu gehören neben der Verkehrsinfrastruktur- und Fahrzeugtypdefinitionen insb. die Definition einzelner Verkehrsmittel, die vor einer Simulation von Routern mit einer Route instanziiert werden müssen. In den meisten Fällen ergeben sich diese Routen aus probabilistischen Modellen oder der Berechnung kürzester Routen. Selbst wenn das Modell der Verkehrsnachfrage (in Form einer Quelle-Ziel-Matrix) die Realität in einem Untersuchungsraum widerspiegelt, sind diese initial erzeugten Fahrzeugrouten nur in den wenigsten Fällen repräsentativ. Die ermittelten Routen sind vergleichbar mit denen, die

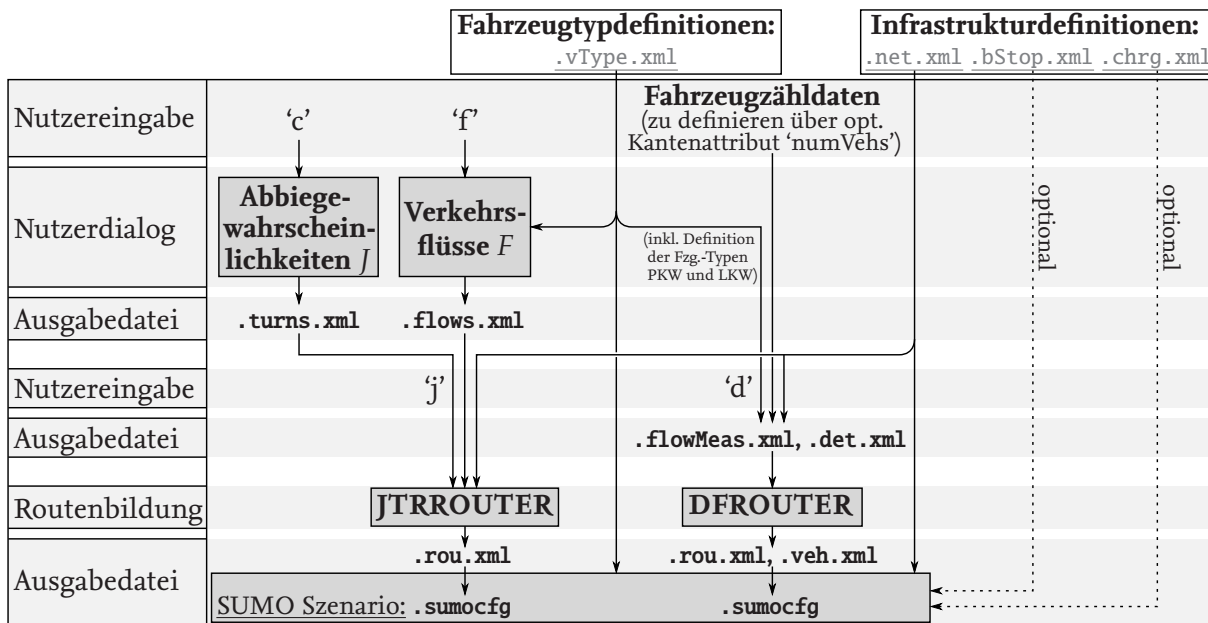


Abbildung 2.13.: Sequenz in eNetEditor für die Erstellung eines Simulationsszenarios für SUMO unter Nutzung von DFROUTER und JTRROUTER für die Verkehrsnachfrage- bzw. Fahrzeugroutendefinition

Verkehrsteilnehmer ohne Kenntnis über den Verkehrszustand in einem Verkehrssystem wählen würden. Wesentlicher Unterschied zum realen Verkehr wäre hierbei, dass *alle* Verkehrsteilnehmer ihre Routen auf diese Weise wählen. Mikroskopische Verkehrsmodelle erfordern daher meist eine anschließende Validierung und ggf. eine Kalibrierung, mit denen gewährleistet werden kann, dass Szenarien zum einen die Ergebnisse makroskopischer Verkehrsmessungen und zum anderen das mikroskopische Verhalten von Verkehrsteilnehmern widerspiegeln [Detering, 2011]. Kapitel 3 widmet sich daher der Kalibrierung von Verkehrsmodellen.

# 3 Kalibrierung mikroskopischer Verkehrsszenarien

Im Rahmen von Simulationsstudien erlauben mikroskopische Verkehrssimulationen eine kostengünstige Untersuchung vielfältiger infrastruktureller sowie betrieblicher Maßnahmen im Verkehr. Aussagekräftige Ergebnisse erfordern, dass diesen Studien validierte Modelle zugrunde liegen. Dazu müssen im Rahmen einer Kalibrierung die Parameter eines Simulationsmodells ermittelt werden. Eine anschließende Validierung gewährleistet sowohl, dass das resultierende Simulationsszenario den vorherrschenden Verkehr in einem betrachteten Untersuchungsraum mit einer vorher festgelegten Genauigkeit realitätsnah nachbildet als auch, dass die Ergebnisse auf ähnliche Szenarien im realen Verkehr übertragbar sind. Es ist im Vorfeld festzulegen, ob die Kalibrierung und Validierung unter Berücksichtigung von makro- und/oder mikroskopischen Aspekten zu erfolgen haben. Erst nach einer erfolgreichen Kalibrierung und Validierung kann ein resultierendes Simulationsmodell für die erforderlichen Analysen genutzt werden.

In diesem Kapitel wird unter Abschnitt 3.1 das grundsätzliche Vorgehen bei sog. Simulationsstudien erläutert, bevor sich in Abschnitt 3.2 dem Stand von Wissenschaft und Technik sowie bestehenden Methoden und Ansätzen gewidmet wird. In Abschnitt 3.3 werden die Anforderungen an die Kalibrierung von Verkehrssimulationen formuliert, die für eine Optimierung der Infrastrukturanordnung genutzt werden sollen.

## 3.1. Durchführung von Simulationsstudien

Gemäß der Richtlinie [FGSV, 2006]<sup>(1)</sup> gliedert sich eine Simulationsstudie in die fünf Abschnitte

1. Vorbereitung,
2. Initialisierung,
3. Kalibrierung sowie Validierung,
4. Simulationsexperiment und
5. Dokumentation,

die in den folgenden Absätzen kurz beschrieben werden.

Im Rahmen einer *Vorbereitung* ist zunächst festzulegen, welche Modellstruktur für die vorliegende Aufgabenstellung einzusetzen ist. Nachfolgend müssen der Untersuchungsraum abgegrenzt und die erforderlichen Daten zur Modellierung der Verkehrsinfrastruktur sowie der Verkehrsnachfrage und ggf. des Verkehrsverhaltens erhoben werden. Darüber hinaus sind die gewünschte Aussagegenauigkeit und der notwendige Detaillierungsgrad festzulegen.

---

<sup>(1)</sup>Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.

Ziel der *Initialisierung* ist die Entwicklung eines fehlerfreien und reproduzierbaren Basismodells, dessen Simulationsergebnisse im weiteren Verlauf der Simulationsstudie ausgewertet werden und ggf. zu einer Adaption der Modellparameter führen. Dieses Modell umfasst die sog. statischen und dynamischen Teilmodelle der Verkehrsinfrastruktur und Verkehrsnachfrage. Abschließend sollte eine Prüfung der Modelle auf Plausibilität erfolgen (bspw. mithilfe einer Visualisierung).

Ist das initialisierte Basismodell eines zu simulierenden Verkehrsszenarios mit allen Konstituenten fertiggestellt, erfolgt im aufwändigsten Schritt die *Kalibrierung und Validierung* des Simulationsmodells. Ziel ist die Entwicklung eines repräsentativen Simulationsszenarios, das die beobachteten Verkehrsverhältnisse bestmöglich widerspiegelt. Für diesen Nachweis wird empfohlen, dass zwei separate Messdatensätze unter vergleichbaren Bedingungen erhoben werden. Für die Modellkalibrierung muss zunächst ein (Modell-)Parameter als Kalibrierungsgröße festgelegt werden. Anschließend erfolgt eine gezielte Einflussnahme auf die festgelegte Kalibrierungsgröße in Abhängigkeit des Modellfehlers unter Verwendung einer der beiden Datensätze. Nach einer erfolgreichen Kalibrierung der Parameter des Basismodells müssen für die Modellvalidierung zunächst Kenngrößen zur Quantifizierung des Modellfehlers eingeführt sowie ein Fehlermaß festgelegt werden. Ein übliches Maß hierfür ist die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers<sup>(2)</sup> (engl.: root mean square error, kurz: RMSE). Für die Validierung sollte ein anderer Datensatz als für die Kalibrierung genutzt werden. Misslingt der Nachweis der Modellvalidität, weil die Abweichungen des Modells zu den erhobenen Messdaten zu groß sind, beginnt dieser Prozess erneut mit einer Modellkalibrierung. Für eine erhöhte Zuverlässigkeit des Ergebnisses wird darüber hinaus die Validierung anhand mehrerer Kenngrößen empfohlen.

Kann die Validität eines Simulationsmodells nachgewiesen werden, erfolgt im Rahmen des *Simulationsexperiments* die für den Zweck entwickelte Anwendung des Simulationsmodells und die Auswertung der Ergebnisse.

Es erfolgt eine abschließende *Dokumentation*, die das Vorgehen und die Ergebnisse der Simulationsstudie erläutert.

Das vom U.S. Federal Highway Administration (FHWA) veröffentlichte *Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software* [Dowling et al., 2004] ist ein englischsprachiges Pendant der o. g. FGSV-Richtlinie [FGSV, 2006]. Ein Vergleich der beiden Werke zeigt nur geringe Unterschiede in der vorgeschlagenen Vorgehensweise bei der Durchführung von Simulationsstudien und ist in [Detering, 2011] (Abbildung 5.1) anschaulich dargestellt. Einzig die Validierung von Simulationen wird in [Dowling et al., 2004] nicht ausführlich betrachtet. Stattdessen wird sich darauf verlassen, dass die zugrundeliegenden Algorithmen in vorangehenden Anwendungen und Studien von den Entwicklern bereits validiert wurden. In [FGSV, 2006] wird hingegen darauf hingewiesen, dass die Kalibrierung und Validierung für die Zuverlässigkeit der Aussagen je nach Anwendungsfall entscheidend sind [Detering, 2011].

## 3.2. Stand von Wissenschaft und Technik

Grundlage für eine Modellvalidierung ist das fertiggestellte Basismodell eines mikroskopisch zu simulierenden Verkehrsszenarios, dessen Konstituenten in Kapitel 2 vorgestellt wurden. Dieses Modell umfasst eine initiale Parameterschätzung der Verhaltensmodelle von Verkehrsteilnehmern und Verkehrsmitteln, die auch eine initiale Routenwahl umfasst. Sofern sich mit diesen die

<sup>(2)</sup>Eine Übersicht weiterer Bewertungsmaße für die Modellvalidierung findet sich in Abschnitt 4.2.6 und in [FGSV, 2006]



Forderungen an die Modellvalidität durch ein Berechnung eines Gütemaßes nicht einhalten lassen, ist eine Modellkalibrierung erforderlich, für die eine Vielzahl an Methoden existiert. Diese werden im nächsten Abschnitt vorgestellt. Dabei wird zwischen folgenden grundsätzlichen Ansätzen bei der Kalibrierung und Validierung unterschieden:

1. Ein mikroskopisches Simulationsmodell wird mit empirischen *mikroskopischen Messdaten* kalibriert und validiert.
2. Ein mikroskopisches Simulationsmodell wird mit empirischen *makroskopischen Messdaten* validiert und kalibriert.
3. Ein mikroskopisches Simulationsmodell wird mit empirischen *mikroskopischen und makroskopischen Messdaten* validiert und kalibriert.

In den folgenden Abschnitten werden die jeweiligen Vorgehen aus der Arbeit [Detering, 2011] zusammengefasst und insb. deren Eignung für die spätere Optimierung einer Energieversorgungsinfrastruktur untersucht.

### 3.2.1. Kalibrierung und Validierung mit mikroskopischen Messdaten

In diesem Ansatz erfolgt die Kalibrierung und Validierung durch Nutzung mikroskopischer Messdaten. Besonderer Wert wird hierbei darauf gelegt, dass das mikroskopische Fahrzeug- und Fahrerverhalten unter Nutzung erhobener mikroskopischer Messdaten repräsentativ parametrisiert wird.

Die Ergebnisse solcher Untersuchungen sind in den Arbeiten [Brockfeld et al., 2004a,b] dargestellt, in denen die Autoren die Kalibrierung zehn verschiedener Fahrzeugfolgemodelle mit zwischen vier und fünfzehn Parametern betrachten und miteinander vergleichen, darunter auch die in Abschnitt 2.4.2.2 beschriebenen Modelle aus [Gipps, 1981], [Fritzsche, 1994] sowie [Nagel und Schreckenberg, 1992]. Die Messdaten stammen aus einem Experiment mit neun Fahrzeugen auf einem Rundkurs. Als Kalibrierungsgröße sowie als Kenngröße für die Validierung wird der Fahrzeugabstand gewählt und als Fehlermaß ein prozentualer Fehler verwendet, der dem mittleren absoluten prozentualen Fehler ähnelt [Brockfeld et al., 2004a,b; Detering, 2011]. Aus einem Fehlermaß zwischen 13 % und 19 % nach der Kalibrierung (sowie zusätzlich ca. 6 % nach Validierung) schlussfolgern die Autoren das Ergebnis, dass sich keines der Modelle für die repräsentative Nachbildung des Folgeverhaltens eignet.

Die Ergebnisse eines ähnlichen Experiments auf dem gleichen Rundkurs (jedoch mit zehn Fahrzeugen) werden in den Arbeiten [Ranjitkar et al., 2004, 2005] vorgestellt. Darin wird die Parameterwahl für acht verschiedene Fahrzeugfolgemodelle untersucht, darunter die aus [Chandler et al., 1958], [Gipps, 1981], [Krauß, 1998] sowie [Nagel und Schreckenberg, 1992]. Als Kenngrößen werden neben dem Fahrzeugfolgeabstand auch die Fahrzeuggeschwindigkeit und -beschleunigung betrachtet. Es wird das gleiche Fehlermaß wie zuvor in den Arbeiten [Brockfeld et al., 2004a,b] gewählt. Im Rahmen der Kalibrierung kommt für die Ermittlung optimaler Parameter ein genetischer Algorithmus zur Anwendung. Je nach Kenngröße und Modell liegt der Fehler in den Bereichen von 12 % bis 21 % (bei Betrachtung des Abstands), von 3 % bis 5 % (bei Betrachtung der Fahrzeuggeschwindigkeit) und von 52 % bis 65 % (bei Betrachtung der Fahrzeugbeschleunigung). In den Arbeiten wird keine Validierung durchgeführt.

Eine weitere Gegenüberstellung von Fahrzeugfolgmodellen und ihrer Kalibrierungen wird in der Arbeit [Punzo und Simonelli, 2005] vorgestellt. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird ein Experiment mit vier in einer Kolonne fahrenden Fahrzeugen durchgeführt, das im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Experimenten im realen Verkehr erfolgt. Es werden vier Modelle (darunter das aus [Gipps, 1981] und [Ahmed, 1999]) mit bis zu elf Modellparametern betrachtet, von denen der Folgeabstand, die Zeitlücke und die Fahrzeuggeschwindigkeit als Kalibrierungsgrößen dienen. Das Fehlermaß wird mit der Wurzel des mittleren quadratischen prozentualen Fehlers (engl.: root mean square percentual error, kurz: RMSPE) gebildet. Für die Optimierung wird ein nichtlinearer, sog. *multipoint*, Optimierungsalgorithmus verwendet. Bei der Kalibrierung ermitteln die Autoren den Fahrzeugfolgeabstand als verlässlichste Größe und verwenden diesen in ihren darauffolgenden Studien. Der prozentuale Fehler liegt nach einer Kalibrierung zwischen 7 % und 24 %. Bei der Validierung kann ein prozentualer Fehler zwischen 14 % und 42 % erreicht werden.

In [Kesting, 2008] wird eine Kalibrierung und Validierung des in [Treiber et al., 2000] vorgestellten Intelligent Driver Models (kurz: IDM) durchgeführt. Als Datengrundlage dienen drei Folgefahrten auf einer einstreifigen Straße im Stadtgebiet Stuttgarts. Als Kalibrierungsgröße wird der Abstand zum Vorderfahrzeug verwendet, dessen Abweichung mit drei Fehlermaßen (Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE), Wurzel des mittleren quadratischen prozentualen Fehlers (RMSPE) sowie einer Kombination dieser beiden) untersucht wird. Für die Identifikation optimaler Parameter wird bei der Kalibrierung ein genetischer Algorithmus angewendet. Nach der Kalibrierung liegt die Wurzel des mittleren quadratischen prozentualen Fehlers (RMSPE) bei 18.0 % (Folgefahrt 1), 24.1 % (Folgefahrt 2) und 28.7 % (Folgefahrt 3). Die Ergebnisse der Validierung werden nur für das kombinierte Fehlermaß angegeben, der im Bereich von 26.9 % bis 41.2 % liegt.

In [Ossen und Hoogendoorn, 2008] wird unter anderem das Fahrzeugfolgmodell aus [Gipps, 1981] untersucht, insb. die Auswirkungen der Wahl des Fehlermaßes, der verwendeten Kalibrierungsgröße sowie des Messfehlers auf das Ergebnis bei der Kalibrierung. Als Fehlermaße kommen der mittlere absolute (/prozentuale) Fehler (MAP und MAPE), die Wurzel des mittleren quadratischen (/prozentualen) Fehlers (RMSE und RMSPE) sowie der Ungleichheitskoeffizient nach Theil (Theil's U, siehe [Theil, 1967]) zur Anwendung. Als Kalibrierungsgrößen werden Fahrzeuggeschwindigkeit, -position und -abstand verwendet. Den Untersuchungen liegen synthetische Folgefahrten zugrunde, die u. a. mit dem Modell aus [Gipps, 1981] simulativ ermittelt werden. Unter Kenntnis der Modellparameter und ihrer Werte wird folgend analysiert, in welchem Umfang eine Optimierung die verwendeten Parameter identifizieren kann. Es zeigt sich, dass bei Fehlern in den Messdaten nur dann eine zuverlässige Schätzung der Modellparameter erfolgen kann, wenn für die Berechnung des Fehlermaßes mindestens zwei Kalibrierungsgrößen genutzt werden.

In [Detering, 2011] wird sich unter anderem der mikroskopischen Kalibrierung des Fahrzeugfolgmodells aus [Gipps, 1981] gewidmet. In dem zugrundeliegenden Experiment wird das Folgeverhalten von Fahrzeugen auf der deutschen Bundesautobahn A2 zwischen Braunschweig und Hannover untersucht. Um den Einfluss des Experiments auf das Verhalten der betrachteten Fahrer zu reduzieren und die Messgrößen weitestgehend zu objektivieren, wird statt einer nach vorn gerichteten Abstandsmessung der Abstand zu nachfolgenden Fahrzeugen gemessen. Als Kalibrierungsgrößen kommen die Modellparameter Abstand und Geschwindigkeit zum Einsatz. Die Kalibrierung wird anhand einer Vielzahl von Fehlermaßen untersucht, darunter MA(/P)E,

RMS/(P)E, Theil's U, sowie die Abweichungen der Mittelwerte und Standardabweichungen zwischen Messdaten und Simulation. Nach der Kalibrierung liegt die Wurzel des mittleren quadratischen prozentualen Fehlers (RMSPE) bei 85 Messfahrten in den Bereichen zwischen 1.1 % und 95.3 % (18.3 % im Mittel, bei Kalibrierung des Fahrzeugfolgeabstands) sowie zwischen 0.6 % und 28.5 % (2.8 % im Mittel, bei Kalibrierung der Geschwindigkeit).

Trotz guter Approximationen des mikroskopischen und kollektiven Fahrverhaltens zeigt sich bei allen vorangehenden Studien, dass sich mit aktuellen Modellen weder die individuellen Verhaltensweisen aller betrachteten Verkehrsteilnehmer noch das Verhalten eines Teilnehmers über einen längeren Zeitraum hinweg präzise reproduzieren lassen. Dies liegt in erster Linie daran, dass bei der alleinigen Betrachtung des Abstands zum Vorderfahrzeug (bzw. anderen Verkehrsinfrastrukturobjekten) und der Reaktion darauf nur ein Teil der hochkomplexen Aufgaben berücksichtigt werden, die ein Fahrer im Rahmen der Fahrzeugführung und Umgebungserfassung ausführt. Bei der Beurteilung konkreter Verkehrssituationen spielen weitere Faktoren eine wichtige Rolle, die aus der Fahrzeugumgebung auf einen Fahrer einwirken, bei den zugrundeliegenden Verhaltensmodellen mikroskopischer Verkehrssimulationen jedoch unberücksichtigt bleiben. Die Forderung nach Verhaltensmodellen, die das tatsächliche Verhalten individueller Verkehrsobjekte besser widerspiegeln, geht neben dem erhöhten Rechenbedarf auch mit einem deutlichen Mehraufwand bei der Modellierung dieser detaillierten Umgebung einher. Darüber hinaus kann die mikroskopische Kalibrierung des Fahrverhaltens einzelner Teilnehmer nicht gewährleisten, dass in den resultierenden Simulationen das kollektive Verhalten in Form makroskopischer Kenngrößen valide reproduziert wird. Die Kalibrierung eines mikroskopischen Fahrzeugfolgmodells erscheint im Kontext der Ladestellenoptimierung dennoch sinnvoll, da sich diese trotz getroffener Vereinfachungen am besten für die Nachbildung präziser Fahrzeugpositionen entlang ihrer Routen auf der Verkehrsweginfrastruktur eignen. Darüber hinaus erlauben sie die differenzierte Betrachtung von Bewegung und Stillstand einzelner Fahrzeugobjekte während des Verkehrsbetriebs, die für die Identifikation geeigneter Ladepunkte erforderlich ist. Es ist jedoch in jedem Fall ein zusätzlicher Kalibrierungsschritt erforderlich, um ein valides *makroskopisches* Verhalten zu gewährleisten. Dies kann bspw. durch die Betrachtung und Anpassung von Fahrzeugrouten erfolgen.

### 3.2.2. Kalibrierung und Validierung mit makroskopischen Messdaten

Neben der Kalibrierung mikroskopischer Verhaltensmodelle von Fahrzeugen entscheidet auch das resultierende makroskopische Verhalten über die Repräsentativität eines betrachteten Szenarios. Eine makroskopische Kalibrierung und Validierung ist daher empfehlenswert und ist darüber hinaus die am häufigsten durchgeführte Kalibrierungsprozedur bei der Erstellung von Verkehrsszenarien. Wie bereits die mikroskopische, beginnt auch die makroskopische Kalibrierung und Validierung mit einem (makroskopisch) unkalibrierten Basismodell. Es werden darauf aufbauend die aggregierten Ergebnisse der mikroskopischen Verkehrssimulation mit den erhobenen makroskopischen Messdaten verglichen. In gleicher Weise wie in Abschnitt 3.2.1, wird für die Ermittlung der Fahrzeugparameter eine iterative Kalibrierung und Validierung durchgeführt, mit denen (im Gegensatz zum Abschnitt 3.2.1) der *makroskopische* Verkehrszustand im Untersuchungsraum bestmöglich widergespiegelt werden kann.

In diesem Abschnitt wird der Stand von Wissenschaft und Technik bei der Kalibrierung

mikroskopischer Verhaltensmodelle mit makroskopischen Daten behandelt. Neben dem Fahrzeugfolgeverhalten hat insb. bei der Betrachtung des städtischen Verkehrs die Routenwahl von Fahrzeugen einen maßgeblichen Einfluss auf makroskopische Kenngrößen. Nach einer Zusammenfassung bestehender Ansätze zur Kalibrierung des Fahrzeugfolgeverhaltens, wird in den zwei darauffolgenden Unterabschnitten die Kalibrierung der Routenwahl mit zwei etablierten Ansätzen vorgestellt: DUAROUTER und Cadyts, die jeweils in [Gawron, 1998b] und [Flötteröd, 2009] vorgestellt sind.

Eine etablierte Anleitung, um durch die Kalibrierung des mikroskopischen Fahrzeugfolgeverhaltens in Verkehrssimulationen makroskopische Kenngrößen zu reproduzieren, findet sich in [Hourdakis et al., 2002]. Die Autoren schlagen darin vor, eine Kalibrierung basierend auf der Verkehrsstärke durchzuführen und dabei die Wurzel des mittleren quadratischen prozentualen Fehlers (RMSPE) sowie Theil's U als Fehlermaß zu nutzen. Um sich auf makroskopisch messbare Kenngrößen zu beziehen, wird die Nutzung der Verkehrsstärke sowie der mittleren lokalen Geschwindigkeit an ausgewählten Punkten im Untersuchungsraum empfohlen. In einem ersten Schritt werden dabei Fahrzeugparameter wie die Wunschgeschwindigkeit, Beschleunigung und Verzögerung als Kalibrierungsgrößen betrachtet. In einem zweiten Kalibrierungsschritt wird mit der Variation von lokalen Geschwindigkeitsbegrenzungen und der Feinanpassung von Fahrzeugparametern angestrebt, dass gemessene Durchschnittsgeschwindigkeiten auf Messabschnitten bestmöglich im simulierten Verkehrsszenario reproduziert werden. Dieses Vorgehen verdeutlicht, dass bei der makroskopischen Kalibrierung und Validierung die Reproduktion des mikroskopischen Verhaltens einzelner Verkehrsmittel zweitrangig ist und deren Anpassung daher nicht an entsprechende Messwerte geknüpft ist.

Ein ähnliches Vorgehen wird in [Dowling et al., 2004] vorgestellt. Der hauptsächliche Unterschied zu [Hourdakis et al., 2002] liegt darin, dass als Kalibrierungsgrößen die Verkehrsstärke, die mittlere Geschwindigkeit ( $\propto$  mittlere Fahrtdauer) und die Rückstaulänge von Fahrzeugen betrachtet wird. Als Fehlermaß dient jedoch nur die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE). Das mikroskopische Verhalten einzelner Fahrzeuge wird nicht weiter betrachtet.

Auch das in den Forschungsberichten [Zhang und Ma, 2008; Zhang et al., 2008] des California PATH Programms vorgestellte Vorgehen für die Kalibrierung mikroskopischer Verkehrsszenarien basiert auf den Ansätzen der Arbeit [Hourdakis et al., 2002]. Vor dem Hintergrund, dass in den meisten Anwendungsfällen makroskopische Kenngrößen von Interesse sind, die Kalibrierung individueller Verhaltensmodelle jedoch oft die größten Fehlerquellen bergen, haben die Autoren ein Vorgehen entwickelt, welches vor der Kalibrierung der Fahrverhaltensmodelle eine zusätzliche Kalibrierung der Abfahrzeitpunkte sowie der gewählten Fahrzeugrouten beinhaltet. Für die Optimierung wird von den Autoren ein genetischer Algorithmus vorgestellt.

Ein weiterer Kalibrierungsansatz findet sich in der Arbeit [Vortisch et al., 2008]. Statt einer Kalibrierung durch Minimierung eines der bisher vorgestellten Fehlermaße, wird durch Parameteranpassung der Fahrzeugfolgemodelle versucht, die Form und Lage der  $q$ - $v$ -Beziehungen<sup>(3)</sup> einer Simulation in Übereinstimmung mit denen der Messungen zu bringen. Die Optimierung erfolgt mit einem evolutionären Algorithmus, der eine Variation von fünf Parametern

<sup>(3)</sup>Als Teil des Fundamentaldiagramms beschreibt das  $q$ - $v$ -Diagramm die Beziehung zwischen dem Verkehrsfluss  $q$  (in  $\frac{\text{Fahrzeuge}}{\text{Zeit}}$ ) und der Stromgeschwindigkeit  $v$  (in  $\frac{\text{Strecke}}{\text{Zeit}}$ ) entlang einer Kante für eine betrachtete Fahrzeugmenge über eine definierte Dauer.

des Fahrzeugfolgeverhaltens in VISSIM vornimmt, um die Fehler zwischen Messungen und Simulation zu minimieren. Das zugrundeliegende Experiment stammt von einem Abschnitt des Kalifornischen Highways U.S. Route 101. Hierfür werden erhobene makroskopische Kenngrößen über die mittlere lokale Geschwindigkeit und Verkehrsstärke an vier Messquerschnitten herangezogen. Für drei dieser Parameter werden deren Standardwerte in VISSIM ermittelt. Für die übrigen zwei Parameter werden zudem mikroskopische Daten des gleichen Streckenabschnitts herangezogen. In der Arbeit wird festgestellt, dass sich mit den aus dem  $q$ - $v$ -Diagramm ermittelten Parametern die mikroskopisch beobachteten Oszillationen der Fahrzeuggeschwindigkeiten gut reproduzieren lassen.

Bei der Kalibrierung mikroskopischer Modellparameter mit makroskopischen Daten wird in zahlreichen Arbeiten darauf hingewiesen, dass resultierende Modelle zwar auf makroskopischer Ebene durchaus realistische Ergebnisse liefern können, wenn diese bspw. anhand des Fundamentaldiagramms validiert werden. Es kann jedoch keine Aussage über die mikroskopische Validität dieser Modelle getroffen werden [FGSV, 2006]. In [Detering, 2011] wird festgestellt, dass die makroskopischen „Modelle zwar auf mikroskopischen Modellannahmen basieren, [einige dieser jedoch] nicht die Zielsetzung haben, das mikroskopische Einzelfahrzeugverhalten valide abzubilden [sondern vielmehr] den makroskopisch beobachteten Verkehrsfluss wiederzugeben“ [Detering, 2011]. In [FGSV, 2006] wird bei der Nutzung von Zellularautomaten sowie anderen mikroskopischen Verhaltensmodellen darauf hingewiesen, dass die valide makroskopische Abbildung des Verkehrsverhaltens oft nur mit physikalisch unrealistischen Modellparameterwerten möglich ist. In [Krauß et al., 1997] wird diese Diskrepanz dadurch gerechtfertigt, dass bei der mikroskopischen Simulation von Autobahnverkehr nur selten die individuellen Fahrzeugführverhalten, sondern vielmehr makroskopische Eigenschaften des Modells von Interesse sind. In [Krauß, 1998] weist selbst der Autor darauf hin, dass das Hauptinteresse bei der Entwicklung seines mikroskopischen Verhaltensmodells auf den qualitativen makroskopischen Eigenschaften resultierender Verkehrsszenarien liegt [Krauß, 1998].

Neben der Kalibrierung des individuellen Folgeverhaltens ist für die Erstellung von mikroskopischen Verkehrsszenarien, die makroskopisch valide sind, eine Kalibrierung der Fahrzeugrouten erforderlich. In den folgenden zwei Abschnitten werden zwei etablierte Ansätze für eine entsprechende Optimierung von Fahrzeugrouten behandelt.

### 3.2.2.1. Dynamisches Nutzergleichgewicht – DUAROUTER

Bei mikroskopischen Verkehrssimulationen hat die Routenwahl von Fahrzeugen einen entscheidenden Einfluss auf die resultierenden Ergebnisse des zugehörigen Verkehrsszenarios, insb. auf die makroskopischen Verkehrskenngrößen. Stehen Daten zur Verkehrsnachfrage im Untersuchungsraum zur Verfügung (bspw. in Form einer Quelle-Ziel-Matrix), können Fahrzeugen in einer ersten Näherung Routen zugewiesen werden, die bspw. aus den kürzesten Wegen ermittelt werden können. Bei der Adaption dieser Strategie auf reale oder simulierte Verkehrsgeschehen sind resultierende Routen in den meisten Fällen stark optimierungsbedürftig. Ein Ansatz zur Optimierung dieser Routen wird in [Gawron, 1998b] vorgestellt und untersucht. Es handelt sich dabei um ein Verfahren, mit dem das *dynamische Nutzergleichgewicht* (engl.: dynamic user equilibrium, kurz: DUE) ermittelt wird. Das Nutzergleichgewicht in einem Verkehrssystem ist dadurch gekennzeichnet, dass kein Fahrzeug seine Route ändern kann, ohne



dabei eine *Verschlechterung* im Sinne der Fahrtdauer oder eines beliebig anderen Gütemaßes (bspw. Energiebedarfs) für sich und andere Verkehrsteilnehmer herbeizuführen. Im Fall einer zeitlich variierenden Verkehrsnachfrage wird das dynamische Nutzergleichgewicht in [Gawron, 1998b] als Variationsproblem formuliert, welches gleichbedeutend ist mit der Formulierung in [Ran und Boyce, 1996] als nichtlineares Programm. Das Problem kann nach einer Relaxierung mit dem in [Frank und Wolfe, 1956]<sup>(4)</sup> vorgestellten Algorithmus gelöst werden, indem es in entkoppelte lineare Probleme unterteilt wird [Gawron, 1998b]. Im Vergleich zum statischen Fall wächst jedoch die Komplexität der erforderlichen Berechnung exponentiell, so dass im Fall großer Netzwerke und vieler Fahrzeugrouten (z. B. bei hohem Verkehrsaufkommen, wo diese Betrachtung sinnvoll wäre) eine analytische Betrachtung dieser Optimierung nicht realisierbar ist.

Aus diesem Grund existiert eine Vielzahl von Methoden und Werkzeugen für die Verkehrsplanung, die auf einem simulationsbasierten Ansatz beruhen. In [Gawron, 1998b] werden die folgenden Vorarbeiten in dieser Domäne hervorgehoben:

- CONTRAM [Leonard et al., 1989], entwickelt am Transport and Road Research Laboratory, Berkshire England,
- INTEGRATION [Rakha und van Aerde, 1996; van Aerde et al., 1996], entwickelt an der Queen's University in Kingston, Kanada,
- DYNASMART [Mahmassani et al., 1995], entwickelt an der University of Texas in Austin, USA, sowie
- DynaMIT [Ben-Akiva et al., 1997, 1998], entwickelt am Massachusetts Institute of Technology, USA.

Aufgrund der hohen erforderlichen Rechenleistung, kamen diese Entwicklungen jedoch nie für die optimierte Routenumlegung in simulierten Verkehrssystemen zum Einsatz, in denen das Modell der Verkehrsweginfrastruktur aus mehr als einigen hundert Kanten bestanden.

Der in [Gawron, 1998b] vorgestellte Ansatz beruht auf der gleichen Pragmatik, der menschliche Fahrer (in einem anfänglich fremden Verkehrssystem) bei ihrer Routenwahl über einen längeren Zeitraum hinweg folgen: Jeder Fahrer variiert seine Route in jedem neuen Versuch so lange, bis er sich gut genug im Verkehrssystem auskennt und glaubt ein Optimum gefunden zu haben. Um bei der Routenwahl robust auf kleine Änderungen in den resultierenden Fahrtauern zu reagieren und starke Schwankungen zu vermeiden, unterliegt die Routenwahl einer Wahrscheinlichkeitsverteilung [Gawron, 1998b].

In einem ersten Schritt erfolgt eine Disaggregation der zeitabhängigen Quelle-Ziel-Matrix, in der jeder Eintrag in eine einzelne Fahrer-Fahrzeug-Definition überführt wird. Jeder dieser Definitionen  $n$  wird beschrieben mit den Parametern

- Quelle  $O_n$ ,
- Ziel  $D_n$ ,
- Abfahrtzeitpunkt  $t_n$  und

---

<sup>(4)</sup>ursprünglich für die Lösung quadratischer Programme entwickelt



- der Menge möglicher Routen  $\mathcal{P}_n$  von  $O_n$  nach  $D_n$ .

Da die vollständige Enumeration *aller* möglichen Routen und Fahrzeuge bereits in kleinen Verkehrsszenarien oft nicht realisierbar ist, beinhaltet  $\mathcal{P}_n$  nur eine kleine Teilmenge aller möglichen Routen, bspw. eine festgelegte Anzahl der  $k$  kürzesten Routen. Darüber hinaus wird jede Fahrer-/Fahrzeug-Einheit mit folgenden Variablen instanziiert:

- eine Wahrscheinlichkeitsverteilung  $p_n : \mathcal{P}_n \rightarrow \mathbb{R}_+$  mit  $\sum_{r \in \mathcal{P}_n} p_n(r) = 1$  und
- Erfahrungswerte über die Fahrtauern oder über ein beliebig anderes Gütemaß  $\tau : \mathcal{P}_n \rightarrow \mathbb{R}_+$ .

Die nachfolgende Optimierung wird iterativ durchgeführt. In jeder Iteration erfolgt eine Simulation und anschließende Aktualisierung der Variablen. Zu Beginn jeder Simulation wird für jedes Fahrzeug  $n$  eine Route  $r$  aus der Menge  $\mathcal{P}_n$  gemäß der Wahrscheinlichkeitsverteilung  $p_n$  gewählt. Nach jeder Simulation werden die Fahrtauern  $\tau_n(r)$  aller Fahrzeuge auf allen (betrachteten/möglichen) Routen aktualisiert. Diese resultieren zum einen aus der tatsächlichen simulierten Fahrtauer eines Fahrzeugs auf einer Route. Da jedoch jedes Fahrzeug pro Simulation nur *eine* Route aus  $\mathcal{P}_n$  wählen kann, wird zum anderen für die Fahrtauern auf alternativen (in der aktuellen Simulation nicht getätigten) Routen eine Schätzung über kantenbasierte Kostenfunktionen vorgenommen. Nach durchgeführter Simulation und Auswertung der Fahrtauern erfolgt eine Anpassung, ein sog. Update, der Wahrscheinlichkeiten  $p_n$ . Mit kürzeren Fahrtauern steigt die Wahrscheinlichkeit der zugehörigen Routenwahl für ein Fahrzeug. Liegt die Änderung der Wahrscheinlichkeiten  $p_n$  zwischen zwei Iterationen unterhalb eines Schwellwertes, kann dieser Prozess beendet werden. Die somit vorliegenden Wahrscheinlichkeiten  $p_n$  bezüglich der Routenwahl aller Fahrzeuge stellen das dynamische Nutzergleichgewicht des betrachteten Szenarios dar und bilden das Ergebnis dieser Kalibrierung. Mit diesem Vorgehen wird versucht, das reale Verhalten bei der Routenwahl von Fahrern nachzubilden. Dabei wird jedoch angenommen, dass *jeder* Fahrer vollständige Kenntnis über kantenbasierte Informationen des Verkehrssystems besitzt. Im realen Verkehrsgeschehen trifft diese Annahme nur selten auf die Verkehrsteilnehmer zu und deckt sich mit der Beobachtung, dass Fahrten in Verkehrsszenarien, die mittels DUAROUTER kalibriert sind, wesentlich geringere Dauern aufweisen, als im realen Verkehrsbetrieb.

DUAROUTER ist seit 2008 ein Bestandteil der SUMO-Distribution [DLR, 2008]. Für die Routenkalibrierung von Verkehrsszenarien mit DUAROUTER unterstützt eNetEditor die Erstellung der erforderlichen Konfigurationen [Kurczveil und López, 2015]. Liegen (bspw. mittels DFROUTER oder JTRROUTER erstellte) Routendefinitionen vor, kann in eNetEditor ein Skript für den DUAROUTER-Aufruf über die Tastatureingabe ‘u’ erzeugt werden. Ein exemplarischer Aufruf von DUAROUTER ist im Anhang unter Abschnitt A.4.1 im Listing A.20 zu finden.

### 3.2.2.2. Kalibrierung disaggregierter Verkehrsnachfrage mit Hilfe von Verkehrszählungen – Cadyts

Ein weiterer Nachteil bei dem in [Gawron, 1998b] vorgestellten Ansatz ist dadurch gegeben, dass bei der Ermittlung des dynamischen Nutzergleichgewichts vorherrschende makroskopische Randbedingungen, wie bspw. die gemessene Verkehrsbelastung einzelner Kanten, unberücksichtigt bleiben. Diesem Defizit widmet sich das Kalibrierungswerkzeug *Cadyts*, welches in [Flötteröd, 2009; Flötteröd et al., 2012] vorgestellt wird.

Aufgrund der kombinatorischen Vielfalt wird auch in [Flötteröd, 2009] ein iteratives Vorgehen für die dynamische Verkehrsumlegung (engl.: dynamic traffic assignment, kurz: DTA) unter Nutzung von Verkehrssimulationen vorgeschlagen. Für die Ermittlung von Fahrzeugrouten wird eine Menge  $\mathcal{N}$  von Quelle-Ziel-Relationen betrachtet. Jedes Quelle-Ziel-Paar  $n \in \mathcal{N}$  wird attribuiert mit

- $d_n$ , einer Anzahl maximal möglicher Fahrten zwischen Quelle und zugehörndem Ziel  $n$ ,
- $\mathcal{R}_n$ , einer Menge verfügbarer Routen zwischen Quelle und zugehörndem Ziel  $n$  und
- $d_{n,i}$ , der Anzahl von Fahrten auf Route  $i \in \mathcal{R}_n$ , mit  $d_n = \sum_{i \in \mathcal{R}_n} d_{n,i}$ .

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrer der Quelle-Ziel-Relation  $n$  die Route  $i$  wählt, beträgt  $P_n(i|\underline{d})$ . Im Gleichgewicht ist diese Wahrscheinlichkeit abhängig vom aktuellen Zustand des Verkehrssystems, der mit der Verkehrsnachfrage  $\underline{d} = (d_{n,i})$  beschrieben wird. Die Ermittlung der optimalen Verkehrsumlegung, mit der die Verkehrsnachfrage  $\underline{d}$  einen mit sich selbst konsistenten Gleichgewichtszustand bildet, wird in [Flötteröd, 2009] als Problem der a-priori Entropiemaximierung formuliert:

$$\max_{\underline{d}} W(\underline{d}) = \max_{\underline{d}} \prod_{n=1}^N d_n! \frac{\prod_{i \in \mathcal{R}_n} (P(i|\underline{d}))^{d_{n,i}}}{\prod_{i \in \mathcal{R}_n} d_{n,i}!}. \quad (3.1)$$

Mit dem Gütefunktional  $W(\underline{d})$  wird die Wahrscheinlichkeit angegeben, dass bei einem bestimmten Modell der Routenwahl  $P_n(i|\underline{d})$  die Verkehrsnachfrage  $\underline{d}$  für das System resultiert. In [Flötteröd, 2009] wird gezeigt, dass eine Maximierung von  $W(\underline{d})$  das Problem der optimalen Verkehrsumlegung löst.

Liegen Verkehrszählungen  $\underline{y}$  einiger oder aller Kanten eines Verkehrssystems vor, müssen in einer Kalibrierung die gewählten Fahrzeugrouten so angepasst werden, dass die Messungen in einem bestmöglichen Maß reproduziert werden. Dazu wird die a-posteriori Entropie maximiert:

$$\max W(\underline{d}|\underline{y}) \propto \max_{\underline{d}} p(\underline{y}|\underline{d}) W(\underline{d}). \quad (3.2)$$

Hierbei wird mit  $p(\underline{y}|\underline{d})$  die Wahrscheinlichkeit angegeben, dass mit einer Nachfrage  $\underline{d}$  die Verkehrszählungen  $\underline{y}$  beobachtet werden können.

Die iterative Arbeitsweise von Cadyts ist vergleichbar mit der von DUAROUTER. Nach einer Initialisierung mit verfügbaren Verkehrszählungen und erforderlichen Modellparametern beginnt eine iterative Anpassung der Routenwahl, bis ein stationärer Zustand erreicht ist. In jeder Iteration wird die Simulation der Verkehrsnachfrage durch eine Verkehrsumlegung (Routenwahl) realisiert und anschließend das Verkehrsangebot in einer Verkehrssimulation ausgewertet.

Ein wesentlicher Vorteil der in [Gawron, 1998b] und [Flötteröd et al., 2012] vorgestellten Methoden ist dadurch gegeben, dass sie unabhängig von der gewählten Modellstruktur in makro-, meso- und mikroskopischen Verkehrsmodellen eingesetzt werden können. Einzige Voraussetzung ist, dass im jeweiligen Simulationswerkzeug einzelne Verkehrsmittelinstanzen (in Cadyts auch als Agenten bezeichnet) mit individuellen Routen betrachtet werden. Sowohl in [Flötteröd, 2009] (Cadyts) als auch in [Gawron, 1998b] (DUAROUTER) wird die Fahrtdauer als Gütemaß verwendet, die jedoch

auf beliebige Kenngrößen sowie Kombinationen dieser erweitert werden kann, wie bspw. der erforderliche Kraftstoff für eine gewählte Route.

Cadyts ist seit 2009 ein Bestandteil der SUMO-Distribution [DLR, 2009a]. Für die Routenkalibrierung von Verkehrsszenarien mittels Cadyts unterstützt eNetEditor die Erstellung der erforderlichen Konfigurationen [Kurzveil und López, 2015]. Neben den (bspw. mittels DFROUTER oder JTRROUTER erstellten) Routendefinitionen erfordert Cadyts für eine Kalibrierung auch

- Messungen über die Verkehrsstärke an Kanten<sup>(5)</sup> (unter Berücksichtigung des Tagesgangprofils und der Messvarianz; eine beispielhafte Definition hierfür wird im Anhang unter Abschnitt A.4.2 in Listing A.21 geboten) sowie
- eine Liste von alternativen Routen, die bspw. während der Optimierung mit DUAROUTER erstellt wird.

Die Skripte mit einem Cadyts-Aufruf können anschließend in eNetEditor über die Tastatureingabe 'y' erzeugt werden. Ein exemplarischer Aufruf von Cadyts ist im Anhang unter Abschnitt A.4.2 im Listing A.22 zu finden.

Über die Nutzbarkeit von mikroskopischen Verkehrsszenarien, die mit makroskopischen Daten kalibriert werden, wird in [Detering, 2011] festgestellt, dass zeitlich und räumlich aggregierte Verkehrskenngrößen keine Aussagen über die Validität individueller Fahrverhalten erlauben. Es wird in vielen Arbeiten darauf hingewiesen, dass die Nachbildung makroskopischer Kenngrößen oft unrealistische Werte für die Parameter der mikroskopischen Verhaltensmodelle erfordert [FGSV, 2006; Krauß, 1998]. Darüber hinaus bietet die Nachbildung eines spezifischen makroskopischen Verhaltens einen mehrdimensionalen Lösungsraum für die Modellparameter des mikroskopischen Fahrverhaltens, so dass *ein* makroskopisches Verhalten mit *vielen* unterschiedlichen Parameterkombinationen erzielt werden kann. Dennoch ist für den vorliegenden Anwendungsfall der Ladestellenoptimierung eine makroskopische Kalibrierung erforderlich. Bei der Relationierung von Ladepunkten zu erfolgten Fahrzeughaltepunkten im Verkehr, spielen makroskopische Kenngrößen, wie bspw. die Verkehrsstärke, Rückstaulängen oder Haltepositionen an Lichtsignalanlagen, eine relevante Rolle bei der Systemauslegung. Einerseits bestimmt die Verkehrsstärke darüber, wie viele Fahrzeuge potenziell von den Ladepunkten profitieren können, andererseits entscheidet die Verteilung der Haltepositionen über die Dauer, die die Fahrzeuge für eine Energieübertragung nutzen können. Besonders bei der Simulation des städtischen Verkehrs, wo für die meisten Fahrten eine (oder mehrere) alternative Route(n) existiert, kann mit einer makroskopischen Kalibrierung die Realitätsnähe von Szenarien erheblich verbessert werden, wenn Fahrzeugrouten im Rahmen einer Verkehrsumlegung mit DUAROUTER oder Cadyts optimiert werden.

### 3.2.3. Kalibrierung und Validierung mit sowohl mikroskopischen als auch makroskopischen Messdaten

Für die realitätsgetreue Nachbildung von Verkehrsszenarien durch ein mikroskopisches Simulationsmodell bietet sich neben der ausschließlichen Betrachtung makro- oder mikroskopischer Kenngrößen auch die Möglichkeit, diese kombiniert für eine Kalibrierung

<sup>(5)</sup>Werden die Kanten im Modell der Verkehrswegeinfrastruktur mit dem Attribut numVehs und einem Wert über die Verkehrsstärke definiert, wird die erforderliche xml-Datei über die Messungen von eNetEditor automatisch erstellt.

der mikroskopischen Verhaltensmodelle zu nutzen. Eine erste Idee hierfür wird in [Brackstone und McDonald, 1994] vorgeschlagen. Ausgehend von einem unkalibrierten Basisszenario, wird mit einer Kalibrierung unter Nutzung von Messungen über das mikroskopische Fahrverhalten begonnen. Eine anschließende Modellvalidierung wird auf Basis empirischer makroskopischer Daten durchgeführt. Der Kalibrierungs- und Validierungsansatz von Brackstone und McDonald wird in einer Reihe von Arbeiten aufgegriffen, die im Folgenden zusammengefasst werden.

[Witte, 1996] widmet sich bspw. der Kalibrierung eines mikroskopischen Verkehrsszenarios, in dem sich 100 Fahrzeuge auf einer einstreifigen Kreisbahn fortbewegen und die Aggregationsdauer makroskopischer Verkehrskenngrößen 60 Sekunden beträgt. Die makroskopische Validität wird lediglich anhand einer qualitativen Betrachtung des aus den Simulationsergebnissen ermittelten Fundamentaldiagramms begründet. Auf einen quantitativen Vergleich des mikroskopischen Fahrverhaltens einzelner Fahrzeuge mit empirischen Messdaten wird in [Witte, 1996] verzichtet.

In [Fellendorf und Vortisch, 2001] schreiben die Autoren über die Möglichkeit in VISSIM, sowohl das mikro- als auch makroskopische Verhalten eines mikroskopischen Verkehrssimulationsmodells zu validieren. Auf die für eine mikroskopische Validierung verwendete Datengrundlage wird nicht weiter eingegangen und die Validierung der mikroskopischen Modellparameter selbst wird qualitativ anhand experimentell ermittelter Fundamentaldiagramme in Simulationen und Messungen vollzogen. Die Autoren schreiben dazu: „Whether the car-following model is appropriately calibrated for a given situation can be checked by validating the simulation results on a macroscopic level“. Das Vorgehen unterscheidet sich somit nicht von dem Ansatz, der bereits unter Abschnitt 3.2.2 beschrieben ist.

In der Arbeit [Chu et al., 2003] wird eine Kalibrierungs- und Validierungsmethode vorgestellt, die in einem mehrstufigen Verfahren makro- und mikroskopische Messdaten für die Erstellung eines mikroskopischen Simulationsmodells nutzt. In einem ersten Schritt wird eine mikroskopische Kalibrierung durchgeführt. Als Kalibrierungsgrößen werden dabei die Parameter Fahrzeugfolgeabstand und Reaktionsdauer des in PARAMICS implementierten Fahrzeugfolgemodells aus [Fritzsche, 1994] genutzt und die Werte 0.625 m und 0.415 s ermittelt. Mit diesen Anfangswerten wird im Anschluss eine makroskopische Kalibrierung durchgeführt, nach deren Abschluss die Parameter gegen die Werte 0.78 m (für den *Folgeabstand*) und 0.66 s (für die *Reaktionsdauer*) konvergierten. Durch die nachträgliche Anpassung des kalibrierten mikroskopischen Folgeverhaltens im Rahmen des zweiten (makroskopischen) Kalibrierungsschrittes, geht jedoch folglich die mikroskopische Validität des zugehörigen Modells verloren. Es ist hervorzuheben, dass die Datengrundlage für die verschiedenen Kalibrierungsschritte aus unterschiedlichen Quellen zusammengetragen wird.

Auch in [Miska et al., 2006b] wird ein Verfahren vorgestellt, in dem ein mikroskopisch kalibriertes Verhaltensmodell anschließend mit makroskopischen Daten validiert wird. Trotz aufwändig erhobener Messdaten, sowohl über die Sensorik einzelner Fahrzeuge als auch über Luftbilder eines Helikopters und einer hoch positionierten Kamera, wird keine Aussage über die *mikroskopische* Validität der ermittelten Parameter getroffen.

In den Arbeiten [Toledo, 2003; Toledo et al., 2007] wird ein Fahrzeugfolge- sowie Fahrstreifenwechselmodell mit einer Methodik vorgestellt, um dieses (ebenfalls in einem zweistufigen Verfahren) zu kalibrieren und zu validieren. Das umfangreiche Modell umfasst 71 Parameter, deren Werte in einem ersten Kalibrierungsschritt von den Autoren mit der

Maximum-Likelihood-Methode ermittelt werden. Die Datengrundlage hierfür bietet eine einstündige Aufzeichnung des Verkehrs auf einem 997 m langen und vierstreifigen Abschnitt des U.S. Highways I-395 aus dem Jahr 1983. Vor der Validierung der ermittelten Modellparameter wird ein zweiter (makroskopischer) Kalibrierungsschritt mit den aggregierten Messdaten *Zeitlücke*, *mittlere Geschwindigkeit* und *Verkehrsstärke* als Kalibrierungsgrößen durchgeführt, um die Parameterwerte zu verfeinern und diese auf den spezifischen Untersuchungsraum anzupassen. Die Validierung umfasst den Vergleich der Messwerte mit den Ergebnissen eines mikroskopischen Simulationsmodells, in dem die Fahrzeuge zu den empirisch erhobenen Zeitpunkten in den Untersuchungsraum einfahren. Als Validierungsgrößen werden die Fahrt Dauern der Fahrzeuge und die Fahrstreifenverteilung gewählt, deren Abweichungen umfangreich anhand verschiedener Fehlermaße bewertet werden. Bei der Anwendung der beschriebenen Kalibrierungs- und Validierungsmethode ist zu beachten, dass die erhobenen Messdaten zum einen stark veraltet sind und das Fahrverhalten ggf. nicht zeitgemäß widerspiegelt wird und zum anderen ein vergleichsweise geringer Geschwindigkeitsbereich abgedeckt wird. Darüber hinaus kann durch die Fokussierung auf den Autobahnverkehr nicht gewährleistet werden, dass die Parameter oder gar die Modelle in der Lage sind, städtisches Verkehrsverhalten abzubilden. Zudem steht nur selten derart umfangreiches und detailliertes Datenmaterial für die Modellkalibrierung und -validierung zur Verfügung.

Vor dem Hintergrund einer optimierten Verkehrsregelung zur Emissionsreduktion widmen sich in [Li et al., 2009] die Autoren der Kalibrierung eines mikroskopischen Verkehrsmodells gewidmet. Die Autoren argumentieren, dass die Kalibrierung mikroskopischer Fahrzeugmodelle mit Verkehrsstärken und Fahrt Dauern nur unzureichenden Aufschluss über den Energiebedarf und über Emissionen bietet. Ermittelte Modellparameter spiegeln (wie bereits unter Abschnitt 3.2.2 erwähnt) nicht zwangsläufig das reale Beschleunigungs- und Bremsverhalten wider, obwohl sie maßgeblich über berechnete Energiebedarfs- und Emissionskennwerte entscheiden. Die Kalibrierung erfolgt daher auf mikroskopischer Ebene mit Daten, die aus Kameraaufzeichnungen über eine Kreuzung gewonnen und für die Optimierungsmaßnahmen detailliert ausgewertet werden. Die Validierung erfolgt auf makroskopischer Ebene, indem Fahrzeuggeschwindigkeits- und -beschleunigungsverteilungen aus Simulationen und Messungen miteinander verglichen werden. Durch die mikroskopische Kalibrierung konnten Differenzen in den berechneten Emissionen in Simulationen gegenüber realen Fahrzeugtrajektorien deutlich gesenkt werden. In den Analysen zeigt sich jedoch, dass Fahrzeuge vor roten Lichtsignalanlagen (modellbedingt) erst zur Einhaltung ihres Sicherheitsabstands (viel zu spät) abbremsen. Abweichungen zum realen Fahrzeugverhalten zeigen sich auch im Beschleunigungsverhalten.

Eine ganzheitliche Kalibrierungs- und Validierungsmethode wird in [Detering, 2011] vorgestellt. Mit resultierenden mikroskopischen Verkehrsmodellen werden die Einflüsse von Fahrerassistenzsystemen auf den Gesamtverkehr untersucht. Bisherige Arbeiten verfolgten überwiegend den Ansatz, mikroskopische Modelle zu kalibrieren. Die notwendige Validierung wird jedoch in den meisten Fällen entweder auf die makroskopische oder mikroskopische Ebene begrenzt. Bei der gesamtverkehrlichen Beurteilung gehen dabei Eigenschaften in den simulierten Szenarien verloren, die jedoch für die Bewertung von Fahrerassistenzsystemen erforderlich sind. Statt einer einstufigen Validierung wird daher eine iterative Validierung auf mikro- sowie makroskopischer Ebene vorgeschlagen. Die zugrundeliegende Idee ist, dass ein mikroskopisches



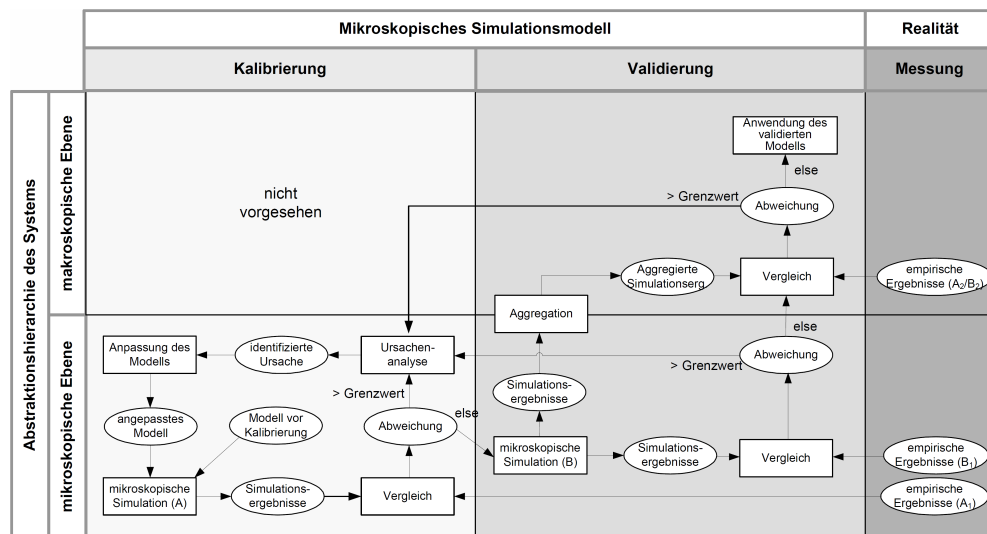


Abbildung 3.1.: Kalibrierung und Validierung eines mikroskopischen Simulationsmodells auf mikroskopischer und makroskopischer Ebene, gemäß [Detering, 2011] (Abbildung 6.1)

Verhaltensmodell nur dann richtig parametrisiert ist, wenn sich sowohl die mikro- als auch die makroskopischen Verhalten reproduzieren lassen. Der klassische iterative Prozess der Kalibrierung und anschließenden Validierung wird gemäß der in Abbildung 3.1 dargestellten Kaskadenstruktur in einen zweiten Validierungsschritt eingebettet [Detering, 2011].

Der Untersuchungsraum von Detering umfasst einen Abschnitt der deutschen Bundesautobahn A2 zwischen Kreuz Braunschweig-Nord und Hannover-Langenhagen. Als makroskopische Datengrundlage dienen minütlich aggregierte Daten von Messquerschnitten, die fahrstreifengenauen Aufschluss über PKW- bzw. LKW-ähnliche Fahrzeuge geben. Mikroskopische Daten über das Fahrzeugfolgeverhalten werden mit einem Messfahrzeug erhoben, welches für einen großen Stichprobenumfang das Verhalten *nachfolgender* Fahrzeuge beobachtet. Dadurch bleiben die Fahrer der beobachteten Fahrzeuge von der Messung weitestgehend unbeeinflusst. Für die Nachbildung des Fahrzeugfolgeverhaltens wird das in [Gipps, 1981] vorgestellte Modell gewählt und mithilfe eines genetischen Algorithmus kalibriert. Als Kalibrierungsgrößen dienen die vier Parameter

- $a$  (maximale Wunschbeschleunigung),
- $b$  (maximale Wunschverzögerung),
- $s$  (effektive Fahrzeuglänge plus min. Folgeabstand) und
- $V$  (Wunschgeschwindigkeit).

Mit dem kombinierten Fehlermaß nach Theil's U wird in der Arbeit eine kombinierte Betrachtung von Fahrzeuggeschwindigkeiten und -folgeabständen vorgenommen und nach der Kalibrierung ein Wert von 0.078 für das durchschnittliche Fehlermaß ermittelt, dessen Maximal- und Minimalwerte in dem betrachteten Stichprobenumfang bei 0.201 und 0.009 liegen. Die ermittelten Parameter sind in Tabelle 3.1 dargestellt.



Tabelle 3.1.: Median, Mittelwert, Standardabweichung sowie prozentuale Anzahl der durch die Intervalle von  $\mu \pm \sigma$ ,  $\mu \pm 2\sigma$  und  $\mu \pm 3\sigma$  erfassten Werte für die identifizierten Parameter des Fahrzeugfolgmodells aus [Gipps, 1981] (übernommen aus [Detering, 2011], Tabelle 9.6)

Parameter	Median	$\mu$	$\sigma$	Anzahl erfasster Werte für den Bereich		
				$\mu \pm \sigma$ [%]	$\mu \pm 2\sigma$ [%]	$\mu \pm 3\sigma$ [%]
<i>a</i>	0.93	1.73	1.88	83.5	88.2	100.0
<i>b</i>	−5.06	−5.07	1.67	69.4	98.8	100.0
<i>s</i>	3.69	5.07	4.19	29.4	100.0	100.0
<i>V</i>	37.55	36.30	6.71	72.9	95.3	96.5
Referenz Normalverteilung				68.27	95.45	99.73

Mit dem in [Detering, 2011] vorgestellten Mehr-Ebenen-Ansatz können deutliche Verbesserungen in der Parameterwahl des Fahrzeugfolgmodells von Gipps und folglich der realitätsgetreuen Nachbildung des Fahrverhaltens erzielt werden. Bedingt durch die Modellstruktur sind jedoch Abweichungen in den Fahrzeuggeschwindigkeiten und Fahrzeugfolgeabständen nicht zu vermeiden. Als hauptsächliche Gründe hierfür werden in [Papatzikou, 2006] folgende (z. T. unrealistische) Modellannahmen aufgelistet, die auf viele andere Fahrzeugfolgmodelle gleichermaßen zutreffen:

- Fahrer können die Geschwindigkeitsdifferenz zum Vorderfahrzeug präzise bestimmen, so dass sich in Simulationen keine typischen *close-following-Spiralen* beobachten lassen.
- Die Fahrzeuggeschwindigkeit wird in festen Schrittweiten angepasst ohne dabei Ablenkungen des Fahrers oder Änderungen seiner Aufmerksamkeit zu berücksichtigen.
- Die Fahrzeuggeschwindigkeit ergibt sich ausschließlich aus der Anpassung an das Verhalten des Vorderfahrzeugs. Weitere vorausfahrende Fahrzeuge oder die auf anderen Fahrstreifen werden nicht betrachtet.
- Nur wenige Modelle berücksichtigen das Verhalten in der Fahrzeuglängsdynamik bei bevorstehenden Fahrstreifenwechseln, in dem die Fahrzeuggeschwindigkeit an die Fahrzeuge des Zielfahrstreifens angepasst werden.

Um ein wirklichkeitstreu mikroskopisches Verkehrsszenario zu entwickeln, welches anschließend für die Optimierung einer Energieversorgungsinfrastrukturanordnung genutzt werden soll, werden im folgenden Abschnitt die zu betrachtenden Kenngrößen identifiziert und die Anforderungen an die Kalibrierung des resultierenden Referenzszenarios formuliert.

### 3.3. Anforderungen an die Kalibrierung und Validierung für die Standortoptimierung von Ladepunkten

Für die Kalibrierung mikroskopischer Verhaltensmodelle zeigt sich, dass insb. für mikroskopische Validierungen oft umfangreiche *mikroskopische* Messdaten benötigt werden. Diese stehen jedoch nur selten in der erforderlichen Art und dem benötigten Umfang zur Verfügung. Eine Kalibrierung und Validierung geht daher in den meisten Fällen mit der individuellen Erhebung der erforderlichen

Daten einher. Darüber hinaus muss je nach Anwendungsfall ein individuelles und für die vorliegende Problemstellung repräsentatives Fehlermaß identifiziert werden.

Für die Standortoptimierung einer Energieversorgungsinfrastruktur sind bei der Anwendung mikroskopischer Verkehrsmodelle folgende Aspekte zu beachten:

**Verteilung der Haltepositionen (mikroskopisch):**

Sofern die Übertragung der erforderlichen Energie in die Fahrzeuge (bspw. aus Gründen der eingesetzten Technik oder der Kosten) während des Fahrzeugstillstands erfolgen soll, ist zu gewährleisten, dass im resultierenden Referenzszenario die räumliche Verteilung der Haltepositionen repräsentativ nachgebildet werden, da diese über die Position potenzieller Ladepunkte entscheiden. Bei der Betrachtung des städtischen Verkehrs kommen dabei in erster Linie Haltepunkte während eines Rückstaus vor Lichtsignalanlagen in Betracht. Es sind jedoch auch die Fahrzeughalte an anderen Positionen im Untersuchungsraum zu analysieren, wie bspw. an Haltestellen durch Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs oder an vorfahrtsregulierten Kreuzungen von Straßen mit unterschiedlichen Prioritäten.

**Verteilung der Haltedauern (mikroskopisch):**

Für die übertragene Energiemenge kann angenommen werden, dass sie konstant zur Ladedauer ist. Da diese stark von der Haltedauer abhängt, muss das resultierende Referenzszenario auch Fahrzeughaltedauern, bspw. vor rotzeigenden Lichtsignalanlagen, an vorfahrtsregulierten Kreuzungen oder an Bushaltestellen, realitätsgetreu wiedergeben. Hierbei ist sowohl die korrekte Anpassung der Lichtsignalzeiten und Fahrgastwechseldauern, als auch die Parametrierung der Verhaltensmodelle von Verkehrsmitteln entscheidend, um Rückstau realitätsgetreu nachzubilden.

**Verkehrsstärken (makroskopisch):**

Die Verkehrsstärke auf einer Kante hat großen Einfluss auf die Verteilung der Haltepositionen und Haltedauern von Fahrzeugen. Eine makroskopische Kalibrierung der Fahrzeugrouten muss gewährleisten, dass in einer Simulation die vorherrschenden Verkehrsstärken auf Kanten nachgebildet werden können.

Aufgrund der erforderlichen präzisen Kenntnis über individuelle Haltedauern und -positionen bestätigt sich an dieser Stelle die Forderung nach einer mikroskopischen Modellstruktur. Der Fokus der Kalibrierung liegt sowohl auf der korrekten Parametrierung des Fahrzeugfolgmodells aus [Krauß, 1998], welches bei der mikroskopischen Verkehrssimulation mit SUMO zum Einsatz kommt, als auch auf der Verkehrsumlegung mit Cadyts, um die Verkehrsnachfrage im Simulationsmodell in Form von Routen repräsentativ nachzubilden. Um die makro- und mikroskopische Validität des resultierenden mikroskopisch simulierten Referenzszenarios zu gewährleisten, ist auch für die Optimierung einer Ladestelleninfrastruktur die Nutzung eines mehrstufigen Validierungskonzeptes gemäß [Detering, 2011] geeignet.

Eine weitere Validierungsmöglichkeit der Optimierungsergebnisse bieten mittels satellitenbasierten Ortungssystemen aufgezeichnete Fahrzeugtrajektorien. Hierfür stehen Positionsdaten der induktiv ladbaren Elektrobusse zur Verfügung, die im Rahmen der Projekte *emil* und *InduktivLaden* gemeinsam mit einer induktiven Ladeinfrastruktur von der Braunschweiger Verkehrs-GmbH für den öffentlichen Personennahverkehr in Betrieb

genommen wurden. Eine Validierung der mittels einer mikroskopischen Verkehrssimulation ermittelten Anordnung der Energieversorgungsinfrastruktur kann erfolgen, indem sie mit den erhobenen Fahrzeugtrajektorien verglichen werden. Einerseits kann geprüft werden, ob die mittels Verkehrssimulationen ermittelte Anordnung der Energieversorgungsinfrastruktur eine ausreichende Energieversorgung für die Fahrzeuge im realen Verkehr gewährleisten würde. Andererseits können die zu entwickelnden Verfahren der Standortoptimierung auf die gemessenen Fahrzeugtrajektorien selbst angewendet werden, um daraus eine geeignete Ladestellenanordnung zu ermitteln und diese anschließend mit den auf Basis der Verkehrssimulation ermittelten Positionen zu vergleichen.

Liegt ein kalibriertes und validiertes Verkehrsmodell für die mikroskopische Simulation des Verkehrs in einem Untersuchungsraum vor, muss für eine nachfolgende Optimierung der Ladestellenanordnung zunächst der Energiebedarf individueller Fahrzeuge ermittelt werden, weil diese über die erforderliche Ladedauer der betrachteten Fahrzeuge entscheidet.



# 4 Emissions- und Energiebedarfsmodellierung

Nach der Erstellung von kalibrierten Verkehrsszenarien können aus deren mikroskopischen Simulationen Fahrzeugtrajektorien gewonnen werden. Diese ergeben sich aus dem Fahrzeugfolge- und Spurwechselverhalten sowie der Routenwahl einzelner Fahrzeuge bzw. dem Umlaufplan bestimmter Fahrzeugflotten. Für die Auswertung dieser Fahrzeugtrajektorien müssen in einem nächsten Schritt Maße sowie Modelle für deren Berechnung eingeführt werden. Diese sind so zu wählen, dass sie sich für die Bewertung verkehrlicher Maßnahmen und dabei insb. für eine durch Ladeinfrastrukturanordnung zu optimierende Zielfunktion der Ladeinfrastruktur für alternativ angetriebene Fahrzeuge eignen. Hierfür bietet sich, besonders im Hinblick auf Maßnahmen zur Optimierung des kollektiven städtischen Verkehrs, die für den Fahrzeug- und Verkehrsbetrieb erforderliche Energie als Argument der Zielfunktion an.

In diesem Kapitel werden in Abschnitt 4.1 existierende Qualitätsmaße und die für deren Berechnung erforderlichen Modelle vorgestellt, die bei der Einführung alternativer Fahrzeugantriebskonzepte relevant sind. Anschließend wird in Abschnitt 4.2 unter Berücksichtigung kinematischer sowie dynamischer Zusammenhänge ein auf Rechenzeit optimiertes, zeitdiskretes Modell vorgestellt und zuletzt anhand von Referenzsimulationen des Herstellers sowie Messungen aus dem realen Verkehrsbetrieb parametrisiert und validiert. Dieses Modell kann als inverses Fahrzeugmodell betrachtet werden, das aus Fahrzeugtrajektorien die dafür erforderliche Energie unter Berücksichtigung nachvollziehbarer Parameter der jeweils betrachteten Fahrzeugtypen (z.B. Fahrzeugmasse und Luftwiderstandskoeffizient) sowie der Betriebsumgebung (z.B. Steigung) berechnet. Unter Nutzung von Fahrzeugtrajektorien, die aus mikroskopisch simulierten Verkehrsszenarien bereitgestellt werden, bildet dieses Fahrzeugmodell eine essentielle Grundlage für die anschließende, optimierte Verortung von Komponenten einer Energieversorgungsinfrastruktur in der Verkehrsinfrastruktur des modellierten, urbanen Verkehrsszenarios sowie für ihre Dimensionierung hinsichtlich bereitzustellender Leistung und weiterer Betriebsparameter.

## 4.1. Stand von Wissenschaft und Technik

Für die Betrachtung alternativer Antriebs- und Versorgungskonzepte, deren Einführung in den vorherrschenden Verkehr und insb. die Quantifizierung ihrer Auswirkungen auf deren Umfeld sowie Umwelt stehen eine Vielzahl an Modellen zur Verfügung. Für diesen Zweck haben sich bei der Untersuchung von mikroskopisch simulierten Verkehrsszenarien in erster Linie Emissionsmodelle etabliert, die vordergründig durch die Gesetzgebung motiviert sind. Zu diesen gehören sowohl Schadstoff- als auch Schallemissionsmodelle, die in den Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 vorgestellt werden. Für die Bewertung verkehrlicher Optimierungsmaßnahmen haben sich zudem Modelle

für die Berechnung des Energiebedarfs etabliert, deren Grundlagen im Abschnitt 4.1.3 vorgestellt werden.

#### 4.1.1. Schadstoffemissionsmodelle

Die Geschichte der Abgasgesetzgebung im Verkehr begann im US-Bundesstaat Kalifornien, wo aufgrund der Smoganfälligkeit von Metropolen bereits Anfang der 1960er Jahre Grenzwerte für die Abgase im Straßenverkehr eingeführt wurden. Im Zuge dessen wurde im Jahr 1967 das *California Air Resource Board* (CARB) gegründet, das seitdem Regelungen für die Verbesserung der Luftqualität erarbeitet und mit Verabschiedung des *Clean Air Acts* und *Zero Emission Mandates* maßgeblich die weltweite Elektrofahrzeugentwicklung in den 1990er Jahren prägte. In der Europäischen Gemeinschaft traten im Jahr 1970 die ersten Vorschriften in Kraft, die zunächst die Emission von Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen begrenzten. Ab dem Jahr 1977 wurden in diesen Vorschriften die zulässigen Emissionen von Stickstoffoxiden und ab 1988 die Grenzwerte von Partikeln aus Dieselmotoren reguliert [Wissen, 2015].

Mit dem Ziel, detaillierte Analysen und Prognosen über die verkehrsbedingte Emissionsbelastung zu ermöglichen, wurde das *Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs* (HBEFA) [Keller, 2014] erarbeitet, welches im Jahr 1995 erstmals vom Umweltbundesamt veröffentlicht wurde und seitdem durch eine Reihe von Neuauflagen mit wachsendem Detaillierungsgrad stets auf aktuellem Stand gehalten wird. Kernbestandteil dieses Handbuchs ist die Übersicht zu Emissionsfaktoren, bei deren Ermittlung die Abhängigkeit der folgenden Parameter berücksichtigt wird:

- Emissionsarten, darunter warme Emissionsfaktoren, Kaltstartzuschläge, Verdampfungsemissionen,
- Fahrzeugkategorien, darunter Personenkraftwagen (PKW), leichte und schwere Nutzfahrzeuge, Reise- und Linienbusse, sowie motorisierte Zweiräder,
- Bezugsjahre zur Berücksichtigung variabler jahresabhängiger Verkehrszusammensetzungen,
- Verkehrssituation, wie z. B. Autobahn ohne Tempolimit, Durchschnitt innerorts usw.,
- Längsneigung von Fahrbahnen (bis zu  $\pm 6\%$ ),
- Einflussfaktoren für die Bestimmung von Kaltstartzuschlägen, wie z. B. Umgebungstemperatur, Standzeitenverteilung bzw. Fahrmuster sowie
- Verdampfungsemissionen und deren Einflussfaktoren, die nach Abstellen des Motors bspw. durch Tankatmung (hervorgerufen durch Schwankungen in der Umgebungstemperatur und dem Umgebungsdruck) auftreten.

Zur Berechnung von Emissionen werden für die Erstellung neuer HBEFA-Auflagen zunächst sog. Schichtfaktoren eingeführt, die die Emissionen einzelner Fahrzeugschichten repräsentieren. In dem HBEFA wird zwischen fünf Fahrzeugkategorien unterschieden, die jeweils weiter in Fahrzeugschichten (Fahrzeuggruppen mit ähnlichem Emissionsverhalten) unterteilt werden. Anschließend wird die Verkehrszusammensetzung aufbereitet, um diese Schichtfaktoren zu gewichten. Da Emissionsfaktoren sich meist auf Fahrmuster beziehen und diese für unterschiedliche Fahrzeugkategorien jeweils verschieden definiert sind, werden diese in einem



nächsten Schritt homogenisiert. Danach können diese fahrzeugabhängigen Schichtfaktoren auf verkehrsabhängige Anwendungsszenarien abgebildet werden. Mittlere Emissionsfaktoren werden hierfür mit dem Verkehrsvolumen multipliziert, um die Gesamtemission spezifischer Anwendungsfälle zu berechnen [Keller et al., 2004].

Die Datengrundlage bilden vom Umweltbundesamt Berlin (sowie dem Schweizer und Österreichischen Pendant) geförderte Messprogramme, die Emissionsmessungen an Fahrzeugen und Untersuchungen zum Fahrverhalten beinhalten [Boulter et al., 2007]. Für die Gewichtung der Emissionsfaktoren nach Fahrzeugschichten werden Fahrleistungserhebungen aus jeweils aktuellen Quellen herangezogen [BMVI, 2014; Follmer et al., 2010, 2003; Hautzinger et al., 2005; Kraftfahrt-Bundesamt, 2013; Palm et al., 1996]. Bei der Unterteilung der Fahrzeugschichten ist das HBEFA stark an die Verordnung 715/2007/EG der Europäischen Gemeinschaft (sowie dessen Vorgänger, Richtlinie 70/220/EWG) angelehnt, die allgemein als *Euro-Norm* bekannt sind [Europäische Kommission, 2007].

Für die Analyse der Auswirkung verkehrlicher Maßnahmen auf die unterschiedlichen Emissionsarten ermöglicht SUMO die Berechnung von Fahrzeugemissionen auf Basis der im HBEFA eingeführten Fahrzeugschichten [DLR, 2009b]. Dieses HBEFA-Modul ist in Form eines sog. Devices implementiert, das die erforderlichen Berechnungen für jedes Fahrzeug individuell durchführt.

Vorteil bei der Nutzung des HBEFA ist der geringe Aufwand für die Berechnung von Emissionen basierend auf Hochrechnungen und/oder Umlegungen. Die Ergebnisse eignen sich jedoch zum großen Teil nur für relative Vergleiche unterschiedlicher Szenarien. Für Absolutwertangaben sind sie ungeeignet. Weiterer Nachteil ist die bisher fehlende Betrachtung von Elektrofahrzeugen, für die im HBEFA v. a. der Energiebedarf relevant wäre. Darüber hinaus ist es nicht möglich, Fahrzeugen neue Parameter bzw. andere (z. B. feiner gestufte) Parameterbereiche zuzuordnen als die im HBEFA bereits enthaltenen. Die resultierenden Ungenauigkeiten haben unmittelbaren Einfluss auf die Ergebnisse. In Tabelle 4.1 sind die in [Keller et al., 2004] definierten Fahrzeugschichten der Fahrzeugkategorie PKW dargestellt. Zu erkennen ist die Unterteilung in drei Hubraum-Bereiche der Motorisierung, sowie die Anlehnung an die Euro-Normen [Europäische Kommission, 2007]. Wenngleich das HBEFA einen umfangreichen Katalog verfügbarer Fahrzeugtypen einführt, fehlen entscheidende Fahrzeugparameter, die wesentlich genauere Ergebnisse für die Berechnung des Energiebedarfs ermöglichen würden.

Ergebnisse einer Analyse gemäß des HBEFA-Ansatzes sind Handlungsempfehlungen für betrachtete Untersuchungsräume, um einen festgelegten Zielwert an Emissionen zu erhalten. Sie dienen oft als Grundlage für die Festlegung zugelassener Fahrzeuge (nach Schadstoffgruppen [Bundesrepublik Deutschland, 2006]) in Umweltzonen sowie für die Einführung einer Innenstadtmaut, wie sie in vielen Europäischen Großstädten bereits erfolgt ist (bspw. London, Oslo oder Mailand) [Krzizek, 2009].

#### 4.1.2. Schallemissionsmodelle

Neben der Schadstoffbelastung ist seit Verabschiedung der Richtlinie 2002/49/EG der Europäischen Gemeinschaft [Europäische Kommission, 2002] zunehmend die Lärmemission für Gemeinden und Städte von großer Relevanz, die hauptsächlich vom Verkehr verursacht wird. Mit Einführung der Richtlinie soll langfristig Umgebungslärm verringert, vorgebeugt oder vermieden werden. Zur

Tabelle 4.1.: Klassifizierung von Fahrzeugschichten der Fahrzeugkategorie PKW gemäß [Keller, 2014]

Antriebs- art	Abgasnorm gem. 70/220/EWG bzw. 715/2007/EG, sonstige Bez.	Fahrzeugkate- gorie, Hubraum	Fahrzeugkate- gorie, Hubraum	Fahrzeugkate- gorie, Hubraum
Benzin	Euro-o, DE-Ost 2-Takt		PKW, -	
Benzin	Euro-o, DE-Ost 4-Takt		PKW, -	
Benzin	Euro-o, <ECE	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Benzin	Euro-o, ECE 15'00	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Benzin	Euro-o, ECE 15'01-02	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Benzin	Euro-o, ECE 15'03	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Benzin	Euro-o, ECE 15'04	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Benzin	Euro-o, AGV82	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Benzin	Euro-o, div. konventionelle	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Benzin	Euro-o, ungereg. Kat.	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Benzin	Euro-o, 3-Wege-Kat. <87	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Benzin	Euro-o, 3-Wege-Kat. 87-90	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Benzin	Euro-o, 3-Wege-Kat. 91-95(CH)	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Benzin	Euro-1, -	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Benzin	Euro-2, -	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Benzin	Euro-3, -	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Benzin	Euro-4, -	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Benzin	Euro-5, -	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Benzin	Euro-6, -	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Diesel	Euro-o, <1986	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Diesel	Euro-o, 1986-88	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Diesel	Euro-o, EURO1.XXIII/ EEA1	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Diesel	Euro-1,	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Diesel	Euro-2,	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Diesel	Euro-3,	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Diesel	Euro-3, mit Dieselpartikelfilter	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Diesel	Euro-4,	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Diesel	Euro-4, mit Dieselpartikelfilter	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Diesel	Euro-5, mit Dieselpartikelfilter	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l
Diesel	Euro-6, mit Dieselpartikelfilter	PKW, <1,4 l	PKW, 1,4-2 l	PKW, >2 l

Tabelle 4.2.: Zweistufiger Umsetzungsplan der Umgebungslärmrichtlinie gemäß § 47 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes [Sächs. Umweltministerium, 2015]

	Lärmkarten bis	Lärmaktionspläne bis
<b>Gemeinden und Städte</b>		
> 250.000 Einwohner	30. Juni 2007	18. Juli 2008
> 100.000 Einwohner	30. Juni 2012	18. Juli 2013
<b>Straßen</b>		
> 6 Mio. Kfz/Jahr	30. Juni 2007	18. Juli 2008
> 3 Mio. Kfz/Jahr	30. Juni 2012	18. Juli 2013
<b>Eisenbahnstrecken</b>		
> 60.000 Züge/Jahr	30. Juni 2007	18. Juli 2008
> 30.000 Züge/Jahr	30. Juni 2012	18. Juli 2013
<b>Flughäfen</b>		
> 50.000 Bewegungen/Jahr	30. Juni 2007	18. Juli 2008

Umsetzung dieser Richtlinie im deutschen Recht wurde § 47 im Bundes-Immissionsschutzgesetz eingeführt, der den Umgebungslärm gesetzlich reglementiert [Bundesrepublik Deutschland, 2001]. Zentraler Bestandteil für Gemeinden und Ballungsräume ist eine sog. *Lärmkartierung*, für die Dokumentation von Geräuschbelastung in Ballungsräumen, an Hauptverkehrsstraßen und Haupteisenbahnstrecken sowie im Bereich von Flughäfen. Mit dem langfristigen Ziel, die Lärmbelastung zu reduzieren, sind nach der initialen Kartierung Lärmaktionspläne zu erstellen, mit denen geeignete Maßnahmen zur Verminderung der Geräuschbelastung dokumentiert werden. Dieser zweistufige Prozess zur Erstellung der Lärmaktionspläne folgte bis 2013 dem in Tabelle 4.2 dargestellten Zeitplan und wird nun in fünfjährigen Abständen aktualisiert.

Zur vereinfachten Kartierung verkehrsbedingter Schallimmissionen wird in [Salomons et al., 2011] das Schallausbreitungs-Modell *Harmonoise* vorgestellt. Das Modell beruht auf der Berechnung der Schallausbreitung von einer Quelle zu einem beliebigen betrachteten Punkt. Für die Untersuchung der Schallimmissionen in der Umgebung von Schallquellen müssen Schallausbreitungen in Abhängigkeit eines definierten Detaillierungsgrades (z.B. einer Auflösung) sowie der Anzahl betrachteter Lärmquellen betrachtet werden.

Für den Aufbau des zugehörigen Modells werden eine Schallquelle und ein Empfänger genutzt. Der Schallpegel  $L$  am Empfänger setzt sich aus der Summe des Schallpegels an der Schallquelle  $L_{\text{source}}$  und eines Ausbreitungsterms  $\Delta L_{\text{prop}}$  zusammen:

$$L = L_{\text{source}} + \Delta L_{\text{prop}}. \quad (4.1)$$

Der Ausbreitungsterm berücksichtigt dabei Dämpfungen, die bedingt durch die Geometrie zwischen Quelle und Empfänger  $\Delta L_{\text{geo}}$  sowie durch Luftabsorptionen  $\Delta L_{\text{air}}$  entstehen. Zusätzlich wird die Schallüberhöhung am Empfänger  $\Delta L_{\text{excess}}$  berücksichtigt, die durch Überlagerung unterschiedlich reflektierter Schallwellen auftritt:

$$\Delta L_{\text{prop}} = \Delta L_{\text{geo}} + \Delta L_{\text{air}} + \Delta L_{\text{excess}}. \quad (4.2)$$

Die Schallüberhöhung  $\Delta L_{\text{excess}}$  ist für komplexere Ausbreitungseffekte verantwortlich und ist

definiert als die Pegeldifferenz:

$$\Delta L_{\text{excess}} = L - L_{\text{free}}. \quad (4.3)$$

$L_{\text{free}}$  ist dabei der Schallpegel, der in einer hindernisfreien Umgebung (einer sog. *free-field condition*, unter Vernachlässigung von Temperaturgradienten, Wind und Boden sowie sonstigen Hindernissen im Umfeld der Schallquelle und des Empfängers [Salomons et al., 2011]) am Empfänger entstehen würde:

$$L_{\text{free}} = L_{\text{source}} + \Delta L_{\text{air}} + \Delta L_{\text{geo}}. \quad (4.4)$$

Während sich die Anteile der Dämpfung durch Luftabsorption  $\Delta L_{\text{air}} = -\alpha_{\text{air}} r$  und geometrische Ausbreitung  $\Delta L_{\text{geo}} = -10 \log_{10}(4\pi r^2)$  (bei punktförmigen Schallquellen) relativ einfach beschreiben lassen, widmen sich die Autoren in [Salomons et al., 2011] zum Großteil der Betrachtung der Schallüberhöhung  $\Delta L_{\text{excess}}$ , mit der die atmosphärisch bedingte Schallbrechung, die Diffraktion, die Reflexion und die Streuung modelliert werden. Für eine detaillierte Herleitung des Modells wird auf [Salomons et al., 2011] sowie dessen Vorarbeit [van Maercke und Defrance, 2007] verwiesen.

Mit dem vordergründigen Ziel der lokalen Immissionsverortung wird deutlich, dass für verlässliche Ergebnisse bei Anwendung von Schallausbreitungsmodellen wie Harmonoise detaillierte Kenntnisse sowohl über die Schallquellen im zu betrachtenden Umfeld als auch über die geometrischen Anordnungen im Untersuchungsraum erforderlich sind. In Abbildung 4.1 wird eine exemplarische Lärmkartierung des Braunschweiger Stadtgebietes aus [Stadt Braunschweig, 2012] gezeigt. Die Lärmkarte basiert auf einem mikroskopischen Verkehrsszenario, die für individuelle Fahrzeuginstanzen die Fahrzeugbewegungen sowie die Schallausbreitungen simuliert. Zudem wird der Emissionseintrag in einzelnen Elementen eines gerasterten Umfelds kumuliert. Dabei wird das Umfeld in Form eines detaillierten Modells der Stadtbebauung berücksichtigt.

SUMO unterstützt seit Version 0.11.0 die auf dem Harmonoise-Modell basierende Ausbreitungsberechnung von verkehrsbedingten Schallquellen sowie die Ausgabe des kumulierten Immissionseintrags auf Kanten und Knoten des Netzmodells [DLR, 2009c].

### 4.1.3. Kinematische Grundlagen für die Berechnung des Energiebedarfs

Grundlage für die optimierte Verortung von Komponenten einer Energieversorgungsinfrastruktur ist die Kenntnis über die zuzuführende Energiemenge: Sie bildet das Komplement zu dem Fahrzeug- bzw. Verkehrsenergiebedarf. Im Allgemeinen wird diese (bei fossilen Kraftstoffen überwiegend in Wärme) umgewandelte (chemische) Energie als *verbrauchte* Energie bezeichnet. Die Modellierung dieses Energiebedarfs stellt keine wissenschaftlich neue Errungenschaft dar, weil die mechanischen und elektrischen Modelle schon seit sehr langer Zeit bestehen.

Heute finden diese hauptsächlich in hochentwickelten Expertensystemen Anwendung, um unter anderem die energetische Bilanz eines Systems vor dessen technischer Umsetzung zu betrachten. Vor Inbetriebnahme der ersten mit Bombardiers Produkt PRIMOVE [Meins und Graffam, 2011] ausgestatteten Fahrzeuge wurde bspw. ein detailliertes Energiemodell entwickelt, um das System unter Berücksichtigung betrieblicher Kenngrößen und konkreter Nutzungsszenarien zu parametrieren. In Abhängigkeit von Fahrzeugparametern, vom daraus resultierenden Energiebedarf sowie von der verfügbaren Ladeleistung konnten Anforderungen an



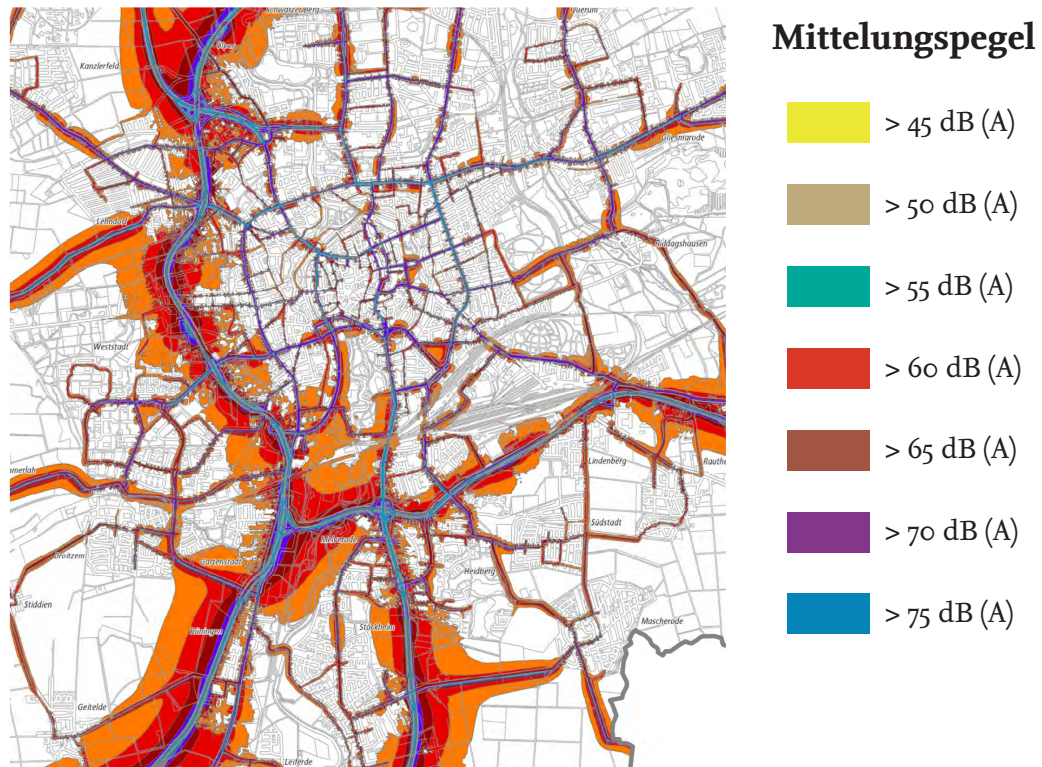


Abbildung 4.1.: Kartierung der Schallimmissionen im Braunschweiger Stadtgebiet, die im Rahmen des Lärminderungsplans erstellt wurden [Stadt Braunschweig, 2012]

die Distanz und Dauer zwischen Ladungen aufgestellt werden. In Abbildung 4.2 wird die Fahrzeugtrajektorie eines beispielhaft erhobenen Fahrzeugumlaufs dargestellt. Die Trajektorie stammt von einem Fahrzeug der Braunschweiger Verkehrs-GmbH auf der Buslinie M19, die im Rahmen des Braunschweiger Projekts *emil* für die Elektrifizierung vorgesehen ist. Diese Trajektorie (links) und der auf Grundlage eines Modells ermittelte Energiebedarf (rechts) dienten der Systemauslegung.

Die Integration vergleichbarer Modelle in die verhältnismäßig neuen mikroskopischen Verkehrssimulationswerkzeuge fehlte jedoch bislang und erforderte, sofern möglich, einschlägige EDV- und Programmierkenntnisse. Die Modellierung des Energiebedarfs von Fahrzeugen in Verkehrssimulationen ist erst von Relevanz, seitdem sich die Nachteile der begrenzten Reichweite von Elektrofahrzeugen in deren praktischen Nutzung manifestierten. Die für konventionelle – mit Benzin oder Diesel betriebene – Verkehrsmittel erforderlichen Prozesse der Energieversorgung wurden in bisherigen Verkehrssimulationen aus nachvollziehbaren Gründen oft vernachlässigt. Insofern war auch der Energiebedarf untergeordnet, weil die Energieversorgungsinfrastruktur in Form von Tankstellen zum Zeitpunkt der Einführung und Verbreitung von Verkehrssimulationen bereits existierte und eine nachträgliche Optimierung ihrer Anordnung weder finanzierbar noch profitabel gewesen wäre. So boten mikroskopische Verkehrssimulationswerkzeuge bis vor Kurzem keine native Unterstützung für die Berechnung des Energiebedarfs von simulierten Verkehrsobjekten.

Das einzige verfügbare Modell, das sich diesem Defizit widmete, ist die in [Maia et al., 2011] vorgestellte Erweiterung für SUMO. Die Berechnungen basieren auf bekannten kinematischen und

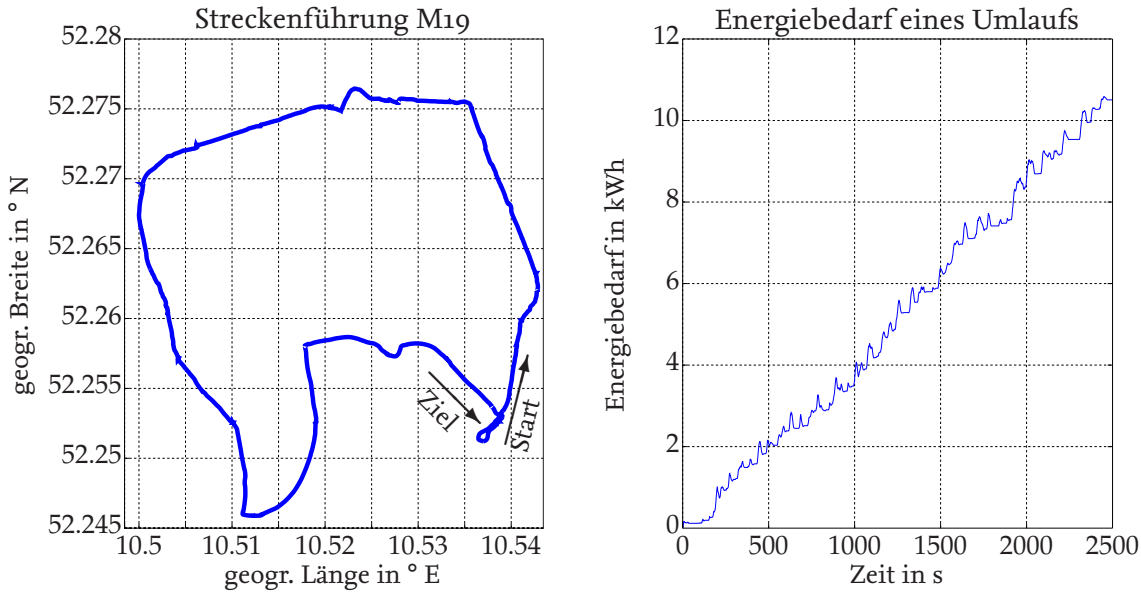


Abbildung 4.2.: Trajektorie eines M19-Umlaufs (links), die als Referenz für die betriebliche Auslegung des Braunschweiger induktiven Ladesystems im Projekt *emil* genutzt wurde und simulierter Energiebedarf für einen Umlauf (rechts), basierend auf einem detaillierten Fahrzeugmodell des Herstellers

elektrotechnischen Grundbeziehungen (siehe [Mitschke, 2013; Pütz, 2012]), die in den folgenden Abschnitten zusammengefasst werden.

Für die Fortbewegung eines Fahrzeugs muss dessen Motor ein Antriebsmoment erzeugen, das über sämtliche Komponenten des Antriebsstrangs an die Räder geleitet wird. Nach Abzug von (Übertragungs-)Verlusten und unter Berücksichtigung sämtlicher Übersetzungen sowie weiteren mechanischen und elektrischen Nebenaggregaten (die entweder von der Antriebswelle direkt oder von der mechanisch angetriebenen Lichtmaschine über das Bordnetz versorgt werden) wird dort eine Zugkraft  $F_z$  erzeugt, die zur Beschleunigung des Fahrzeugs alle Fahrwiderstände  $F_w$  überwinden muss. Der Energiebedarf eines Fahrzeugs wird neben dem Fahrverhalten maßgeblich von der Leistung des Antriebs beeinflusst, mit dessen Auslegung Fahrwiderstände zu überwinden sind. Diese setzen sich aus dissipativen und konservativen Anteilen zusammen. Zu dem dissipativen Anteil gehören *Verluste*, die durch Luft-, Roll- und Kurvenreibung in Energieformen umgewandelt werden, die anschließend nicht mehr für den Vortrieb des Fahrzeugs genutzt werden können. Zu dem konservativen Anteil gehören mit Steigungs- und Beschleunigungswiderstand die Kräfteanteile, die aus der chemischen Energiereserve des Fahrzeugs (Tank oder Batterie und nach Abzug von Übertragungsverlusten) direkt in Bewegungsenergie zur Überwindung rotatorischer und translatorischer Trägheiten sowie in potenzielle Energie gewandelt werden. Die beschriebenen Anteile und deren Zuordnung werden in Gleichung 4.5 bilanziert und sind in Abbildung 4.3 dargestellt:

$$F_z = F_w = \underbrace{F_{\text{luft}} + F_{\text{roll}} + F_{\text{kurve}}}_{\text{dissipativ}} + \underbrace{F_{\text{steig}} + F_{\text{beschl}}}_{\text{konservativ}}. \quad (4.5)$$

Für die Berechnung der jeweiligen Komponenten der Arbeit, die aufgrund der einzelnen



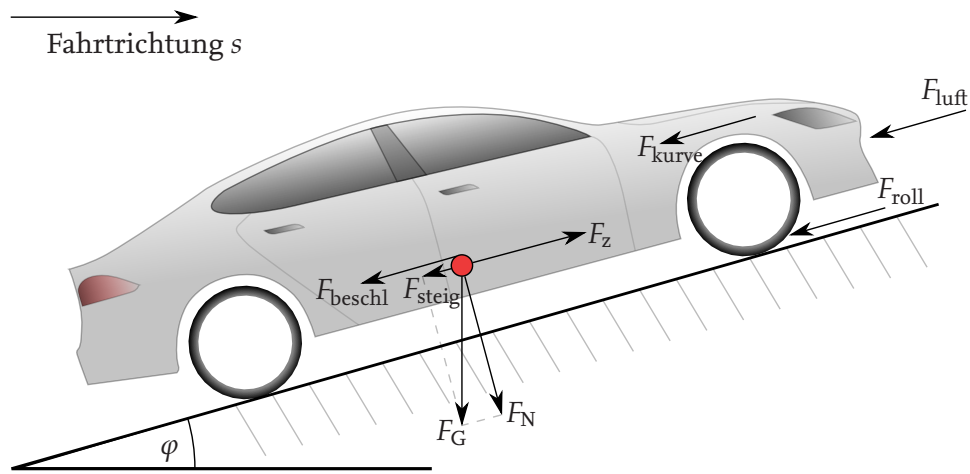


Abbildung 4.3.: Wirkende Fahrwiderstände und Zugkraft an einem Fahrzeug

Widerstände verrichtet wird, müssen die wirkenden Kräfte in Fahrtrichtung über den Fahrweg des Fahrzeugs integriert werden. Für die Berechnung der kombinierten für den Antrieb erforderlichen Arbeit  $W_{\text{antr}}$  muss das in Gleichung 4.6 dargestellte Linienintegral der Zugkraft  $F_z$  über den Weg  $s(x, y, z)$  gebildet werden:

$$W_{\text{antr}} = \int_{x_1}^{x_2} \vec{F}_z(s) d\vec{s}. \quad (4.6)$$

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Fahrwiderstände erläutert, die im Rahmen eines mechanischen Teilmodells als Kräfte betrachtet werden. Für eine Beschleunigung müssen diese von der Zugkraft  $F_z$  des betrachteten Fahrzeugs überwunden werden.

#### 4.1.3.1. Luftreibungswiderstand

Bei der Bewegung eines Fahrzeugs wird dieses als umströmter Körper aufgefasst, weil sich vor der Stirnfläche des Fahrzeugs Luft anstaut und dieser Druck in Richtung des Vakuums hinter dem Fahrzeug der Fahrzeugbewegung entgegenwirkt. Der aufgebaute Luftdruck fällt anschließend in Richtung des Vakuums hinter dem Fahrzeug ab und ruft weitere Querströmungen auf, die zu induzierten Widerständen führen. Zusätzlich entstehen aus dem Impulsverlust der Strömung (z. B. in Radhäusern, Kühlern etc.) innere Widerstände und zuletzt führt die Reibung zwischen Luft und Fahrzeugoberfläche selbst zu einem sog. Oberflächenwiderstand (laminare Strömung) [Mitschke, 2013]. Zur Berechnung des Luftreibungswiderstands hat sich die Gleichung 4.7 etabliert, in der die laminare Strömung vernachlässigt wird:

$$F_{\text{Luft}} = \frac{1}{2} c_w \rho_{\text{Luft}} A_{\text{FzgStirn}} v^2. \quad (4.7)$$

Die aus der Strömung resultierende Widerstandskraft am Fahrzeug ist demnach abhängig von

- der Anströmgeschwindigkeit  $v$ , die sich aus den Vektoren der Fahrzeug- und Windgeschwindigkeit zusammensetzt und oft mit der Fahrzeuggeschwindigkeit angenähert wird,

Tabelle 4.3.: Typische Wertebereiche des Luftwiderstandskoeffizienten in Abhängigkeit der Fahrzeugform gemäß [Pütz, 2012]

Fahrzeugform	Luftwiderstands- koeffizient $c_w$
PKW-Limousine	0.26 ... 0.35
PKW-Kombi	0.30 ... 0.34
LKW/LKW-Zug	0.80 ... 1.50
Bus	0.60 ... 0.70
Motorrad	0.60 ... 0.70

- der angeströmten Fläche  $A_{\text{FzgStirn}}$ , die der Projektionsfläche in Bewegungsrichtung des Fahrzeugs zum Luftstrom entspricht und unter Vernachlässigung von Wind oft vereinfacht als Stirnfläche des Fahrzeugs bezeichnet wird,
- der Luftdichte  $\rho_{\text{Luft}}$  ( $1.2041 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  bei  $20^\circ\text{C}$  auf Meeresspiegelhöhe) und
- der Fahrzeugform, die mit dem dimensionslosen Stömungs- bzw. Luftwiderstandskoeffizienten  $c_w$  quantifiziert wird.

Aufgrund der quadratischen Abhängigkeit des Luftreibungswiderstands  $F_{\text{luft}}$  von der Anströmgeschwindigkeit  $v$  (siehe Gleichung 4.7) wird der Luftwiderstand von Fahrzeugen selbst bei *ungünstiger* Fahrzeugform mit hohem Luftwiderstandskoeffizient  $c_w$  erst bei höheren Geschwindigkeiten relevant und bei niedrigen Geschwindigkeiten oft vernachlässigt. In Tabelle 4.3 sind typische Wertebereiche des Luftwiderstandskoeffizienten für unterschiedliche Fahrzeugformen aufgelistet.

#### 4.1.3.2. Rollreibungswiderstand

Beim Rollen eines Fahrzeugs treten Reibungsverluste an den Reifen auf, die der Fahrzeugbewegung entgegenwirken und die durch die Zugkraft für eine Beschleunigung des Fahrzeugs ebenfalls überwunden werden müssen. Größter Anteil dieser Widerstandskraft bildet der Roll- oder Walkwiderstand, der auf die Verformung des Reifens zurückzuführen ist. Zur detaillierten Betrachtung dieses Verlustanteils wird ein Reifen als differenzielles Feder-Dämpfer-System modelliert, durch dessen Verformung ein Teil der Bewegungsenergie aufgenommen wird [Pütz, 2012]. Ein weiterer Verlustanteil ist auf den Schwallwiderstand zurückzuführen, bei dem ein Teil der Energie in das *Wegdrücken* von Bodenmaterial oder Wasser (und anderen Materialien) auf der Fahrbahn vor dem Reifen gewandelt wird. Ein Reifen *schiebt* eine Bodenwelle vor sich her (in Abbildung 4.4 rot gekennzeichnet), aufgrund der das betrachtete Fahrzeug stets einen Anstieg bewältigen muss. Auf trockener und fester Fahrbahn sind Verluste durch Schwallwiderstand bei Gummibereifung oft sehr gering, spielen hingegen bei schweren Fahrzeugen, geringen Kontaktflächen (wie z.B. bei Eisenbahnen) und/oder nasser Fahrbahn eine große Rolle. Zur Veranschaulichung von Roll- bzw. Walk- sowie Schwallwiderstand findet sich in Abbildung 4.4 die schematische Darstellung eines rollenden Reifens. Ein weiterer Verlust ist auf den Wellenwiderstand zurückzuführen, mit dem Unebenheiten und der damit verbundene Aufbau von Schwingungen im federnd aufgehängten Fahrzeug berücksichtigt werden. Durch die Konizität

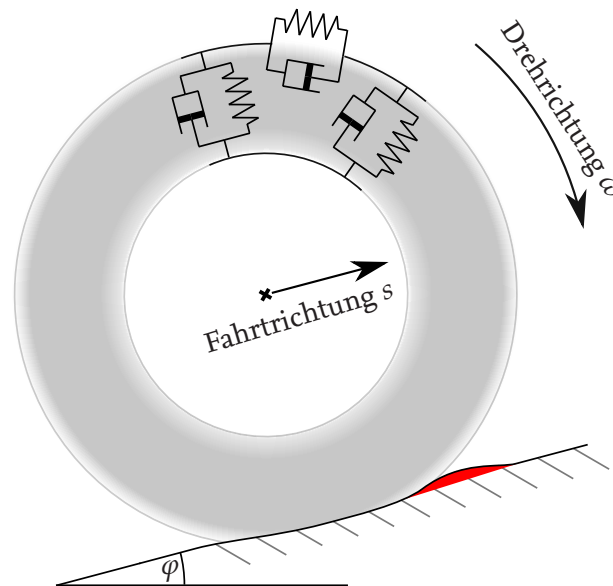


Abbildung 4.4.: Schema eines rollenden Reifens für die Herleitung von Roll- und Schwallwiderstand

eines Reifens und den festgelegten Vorspurwinkel entsteht ein sog. Vorspurwiderstand und unter Berücksichtigung von Kurvenfahrten Seitenkraftwiderstände. Geringe Anteile dieser überwiegend in Querrichtung wirkenden Seitenkräfte treten in Längsrichtung auf und wirken somit der Fahrzeugbewegung entgegen.

Für eine genäherte und summierte Betrachtung der genannten Rollreibungsverluste wird oft Gleichung 4.8 verwendet:

$$F_{\text{roll}} = c_{\text{roll}} m g \cos \varphi. \quad (4.8)$$

Die auf rollende Reifen zurückzuführende Widerstandskraft am Fahrzeug hängt ab von

- dem Steigungswinkel  $\varphi$ ,
- der Erdbeschleunigung  $g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ,
- der Fahrzeugmasse  $m$ , die auch die Masse der Beladung beinhaltet und
- einem Rollwiderstandskoeffizienten  $c_{\text{roll}}$ , mit dem der Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahnbelag und dadurch die Verluste parametrisiert werden.

Bei geringen Geschwindigkeiten dominieren Verluste, die auf den Rollwiderstand zurückzuführen sind. Diese müssen bei der Betrachtung des Energiebedarfs von Verkehrsmitteln insb. im städtischen Verkehr zwingend berücksichtigt werden.

#### 4.1.3.3. Kurvenwiderstand

In Kurvenfahrten wirken Querkräfte auf das Fahrwerk eines Fahrzeugs, die für eine stabile Fahrzeugführung über die Lenkung kompensiert werden müssen. Im Hinblick auf den Energiebedarf wirken einige dieser Kräftekomponenten der Fahrzeugbewegungsrichtung entgegen und müssen somit bei einer Energiebilanzierung berücksichtigt werden. Die Herleitung dieser Verluste erfordert die Betrachtung kinematischer und dynamischer Größen eines Fahrzeugs.

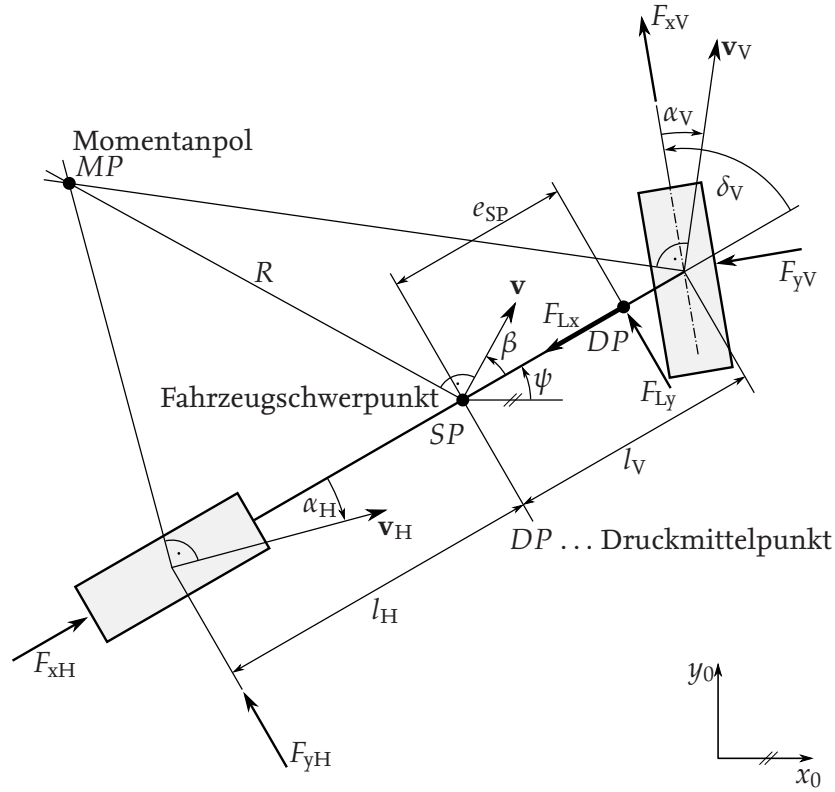


Abbildung 4.5.: Kinematische Größen und Kräfte des Einspurmodells gemäß [Mitschke, 2013]

Hierfür werden Fahrzeugkinematik und -dynamik auf das in Abbildung 4.5 dargestellte Einspurmodell reduziert. Für den Kurvenwiderstand wird berücksichtigt, dass die Vorder- und Hinterreifen aufgrund dieser Querkräfte jeweils einen Schräglaufwinkel  $\alpha_V$  und  $\alpha_H$  aufweisen können. Die Bewegungsrichtung der Reifen erfolgt bei Kurvenfahrten nicht zwingend senkrecht zu den Rotationsachsen entlang der sich die Reifen drehen, sondern versetzt um die Schräglaufwinkel  $\alpha_H$  und  $\alpha_V$ , aus denen sich der Momentanpol  $MP$  ergibt [Mitschke, 2013].

Eine Herleitung des Kurvenwiderstands findet sich in [Mitschke, 2013]. Dort werden zunächst die Bewegungsgleichungen durch Bilanzierung aller angreifenden Kräfte und Momente aufgestellt. Die wirkenden Kräfte sind in Abbildung 4.5 veranschaulicht. Dabei bezeichnen  $F_{xV}$  und  $F_{xH}$  die vorderen und hinteren Umfangskräfte, die in der Fahrbahnebene in die Drehrichtung der Reifen wirken, und  $F_{yV}$  sowie  $F_{yH}$  die vorderen und hinteren Seitenkräfte, die senkrecht zur Drehrichtung der Reifen wirken. Die seitliche Luftkraft  $F_{Ly}$  sowie der Luftwiderstand  $F_{Lx}$  wirken auf den Druckmittelpunkt  $DP$ , der sich in einem Abstand von  $e_{SP}$  zum Fahrzeugschwerpunkt  $SP$  befindet. Die Bewegung des Fahrzeugschwerpunktes  $v$  sowie die Tangentialbeschleunigung  $\dot{v}$  wirken tangential zur Bahnkurve, wohingegen die Zentripetalbeschleunigung  $v^2/R$  in Richtung des Momentanpols  $MP$  wirkt. Mit  $R$  wird dabei der Krümmungsradius  $\overline{MP SP}$  beschrieben. Unter Berücksichtigung der Fahrzeugmasse  $m$  sowie dessen Trägheitsmoment  $J_z$  um den Schwerpunkt  $SP$ , der Vorderradeinschlag- ( $\delta_V$ ), Schwimm- ( $\beta$ ) und Gierwinkel ( $\psi$ ) ergeben sich die folgenden

Kräftegleichgewichte in Fahrzeuglängs- und -querrichtung

$$m \frac{v^2}{R} \sin \beta - m \dot{v} \cos \beta + F_{xH} - F_{Lx} + F_{xV} \cos \delta_V - F_{yV} \sin \delta_V = 0, \quad (4.9)$$

$$m \frac{v^2}{R} \cos \beta - m \dot{v} \sin \beta - F_{yH} - F_{Ly} + F_{xV} \sin \delta_V - F_{yV} \cos \delta_V = 0 \quad (4.10)$$

sowie das Momentengleichgewicht um den Fahrzeugschwerpunkt  $SP$

$$J_z \ddot{\psi} - (F_{yV} \cos \delta_V + F_{xV} \sin \delta_V) l_V + F_{yH} l_H - F_{Ly} e_{SP} = 0. \quad (4.11)$$

Die Zentripetalbeschleunigung  $v^2/R$  ist abhängig vom Kurswinkel  $(\beta + \psi)$  des Fahrzeugs und kann durch Umstellung der Formel für die Berechnung der Bahntangentialgeschwindigkeit  $v = (\dot{\beta} + \dot{\psi}) R$  mit kinematischen Größen beschrieben werden:

$$\frac{v^2}{R} = v^2 \frac{(\dot{\beta} + \dot{\psi})}{v} = v (\dot{\beta} + \dot{\psi}). \quad (4.12)$$

Eingesetzt in Gleichungen 4.9 bis 4.11 ergeben sich folgende Bewegungsgleichungen

$$mv (\dot{\beta} + \dot{\psi}) \sin \beta - m \dot{v} \cos \beta + F_{xH} - F_{Lx} + F_{xV} \cos \delta_V - F_{yV} \sin \delta_V = 0 \text{ und} \quad (4.13)$$

$$mv (\dot{\beta} + \dot{\psi}) \cos \beta - m \dot{v} \sin \beta - F_{yH} - F_{Ly} + F_{xV} \sin \delta_V - F_{yV} \cos \delta_V = 0. \quad (4.14)$$

Wird von einer stationären Kreisfahrt mit konstanter Fahrgeschwindigkeit ( $\dot{v} = 0$ ) ausgegangen, und werden zusätzlich große Schräglaufwinkel der Reifen berücksichtigt, ergibt sich für die Summe der Umfangskräfte unter der Annahme kleiner Vorderradeinschläge  $\delta_V$  und Schwimmwinkel  $\beta$ :

$$F_{xV} + F_{xH} = F_{Lx} - mv\dot{\psi} \left( \sin \beta - \frac{l_H}{l} \sin \delta_V \right). \quad (4.15)$$

Unter weiterer Berücksichtigung, dass die Geschwindigkeitskomponenten am Vorder- und Hinterrad in Fahrzeuglängsrichtung gleich sind

$$v \cos \beta = v_V \cos (\delta_V \alpha_V) = v_H \cos \alpha_H \quad (4.16)$$

und die Quergeschwindigkeitskomponenten sich durch die Gierwinkelgeschwindigkeit  $\dot{\psi}$  unterscheiden

$$v_V \sin (\delta_V \alpha_V) = l_V \dot{\psi} + v \sin \beta \quad (\text{für das Vorderrad}) \text{ und} \quad (4.17)$$

$$v_H \sin \alpha_H = l_H \dot{\psi} - v \sin \beta \quad (\text{für das Hinterrad}), \quad (4.18)$$

ergibt sich

$$\sin \beta = \frac{l_H}{l} \sin \delta_V - \frac{l_H}{l} \alpha_V - \frac{l_V}{l} \alpha_H. \quad (4.19)$$

Eingesetzt in Gleichung 4.15 ergibt sich für die summierten Umfangskräfte:

$$F_{xV} + F_{xH} = F_{Lx} - mv\dot{\psi} \left( \frac{l_V}{l} \sin \alpha_H + \frac{l_H}{l} \sin \alpha_V \right). \quad (4.20)$$

Bei Geradeausfahrt sind die zu überwindenden Umfangskräfte gleich dem Luftwiderstand  $F_{Lx}$ , der in Abschnitt 4.1.3.1 beschrieben ist. Erst bei einer Kurvenfahrt ( $\dot{\psi} \neq 0$ ) führt der rechte Summand von Gleichung 4.20 zu einer zusätzlichen Widerstandskraft.

Damit ergibt sich der Kurvenwiderstand  $F_{\text{kurve}}$ , den ein Fahrzeug neben Luft- und Rollreibung in Kurvenfahrten zusätzlich überwinden muss:

$$F_{\text{kurve}} = mv\psi \left( \frac{l_V}{l} \sin \alpha_H + \frac{l_H}{l} \sin \alpha_V \right). \quad (4.21)$$

Der Kurvenwiderstand ist abhängig von

- der Fahrzeugmasse  $m$ , die auch die Masse der Beladung beinhaltet,
- der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$ ,
- der Gierwinkelgeschwindigkeit oder Gierrate  $\psi$ ,
- den Schräglaufwinkeln an Vorder- und Hinterrad  $\alpha_V$  und  $\alpha_H$ ,
- den Abständen der Vorder- und Hinterachse zum Fahrzeugschwerpunkt  $l_V$  und  $l_H$  sowie
- dem Abstand zwischen Vorder- und Hinterachse  $l = l_V + l_H$ .

Es wird darauf hingewiesen, dass der in diesem Abschnitt hergeleitete Kurvenwiderstand auf die Elastizität (und daraus resultierenden Schräglaufwinkeln  $\alpha_V$  und  $\alpha_H$ ) von Gummibereifungen zurückzuführen ist und daher auch nur dort Anwendung finden sollte. Verglichen mit Roll- und Luftreibungswiderstand ist der Kurvenwiderstand untergeordnet, besonders bei Stadtfahrten, wo die auftretenden Zentripetalbeschleunigungen aufgrund niedriger Geschwindigkeiten oft gering sind. Der Kurvenwiderstand wird daher bei der Modellierung von Straßenfahrzeugen oft vernachlässigt, so auch in [Maia et al., 2011]. Bei Eisenbahnen hingegen sind Verluste durch Kurvenreibung im Verhältnis zu übrigen Verlustanteilen von wesentlich größerer Bedeutung. Dort sind sie auf *starre Achsen* und ihre Gleitbewegung im Rad-Schienen-Kontakt zurückzuführen. Die Widerstandskraft gliedert sich bei Schienenfahrzeugen in drei Komponenten:

1. Widerstandskraft durch Längsgleiten, wodurch die unterschiedlichen Strecken der kurveninneren und -äußeren Räder ausgeglichen werden,
2. Widerstandskraft der Drehgleitbewegung, die bei Kurvenfahrten durch die Drehung des Fahrzeugs um dessen Mittelpunkt entsteht und
3. Widerstandskraft der Spurkranzgleitbewegung, der durch den sog. (stabilisierenden) Sinuslauf entsteht.

Bei Schienenfahrzeugen werden diese drei Komponenten kollektiv als *Bogenwiderstand* bezeichnet. Da sich diese Arbeit vordergründig auf Straßenfahrzeuge fokussiert, wird für die ausführliche Modellierung des Bogenwiderstands bei Schienenfahrzeugen an dieser Stelle auf die Arbeiten [Pachl, 2008; Wende, 2003] verwiesen.

#### 4.1.3.4. Steigungswiderstand

Beim Fahren entlang einer Steigung mit dem Neigungswinkel  $\varphi$  (vgl. Abbildungen 4.3 und 4.4), wirkt die Hangabtriebskraft (bei Bergauffahrt) entgegen oder (bei Bergabfahrt) in Richtung der Fahrzeugbewegung. Dieser Fahrwiderstand führt zum Zeitpunkt einer Bergauffahrt zu einem erhöhten Energiebedarf. Da diese in den Zuwachs der potenziellen Fahrzeugenergie gewandelt



wird, kommt sie bei einer späteren Bergabfahrt einem geringeren Energiebedarf für den Antrieb zugute. Die jeweiligen Wandlungen sind nicht verlustfrei. Der Steigungswiderstand errechnet sich aus der Hangabtriebskraft:

$$F_{\text{steig}} = m g \sin \varphi. \quad (4.22)$$

Der Steigungswiderstand ist abhängig von

- der Fahrzeugmasse  $m$ , die auch die Masse der Beladung beinhaltet,
- der Erdbeschleunigung  $g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  und
- dem Neigungswinkel der Fahrbahn  $\varphi$ .

Dadurch, dass Fahrzeugtrajektorien überwiegend als geschlossene Kurven betrachtet werden, d.h. sie werden dort beendet, wo sie begonnen wurden ( $\int \vec{v}(x, y, z) d\vec{z} = 0$ ), ist der Steigungswiderstand nicht als dissipativer Verlustanteil zu verstehen. Eine bei einer Bergauffahrt in potentielle Energie gewandelte Energiemenge äußert sich bei einer späteren Bergabfahrt durch einen geringeren Energiebedarf. Diese Betrachtung trifft analog für den folgend beschriebenen Beschleunigungswiderstand zu, bei dem der Energiebedarf durch den Zuwachs der kinetischen translatorischen und kinetisch rotatorischen Fahrzeugenergie begründet ist. Zu beachten ist jedoch, dass bei einer Bergabfahrt die zuvor in potenzielle *konservierte* Fahrzeugenergie nicht vollständig für den Antrieb zurückgewonnen werden kann (ebenso wenig, wie die aus der Energiereserve entnommene Energiemenge zuvor vollständig in potenzielle Energie gewandelt werden konnte). Diese Übertragungs- bzw. Wandlungsverluste sind in jedem Fall zu berücksichtigen.

#### 4.1.3.5. Beschleunigungswiderstand

Im Rahmen eines mechanischen Teilmodells muss letztlich auch der Fahrwiderstand berücksichtigt werden, der auf die translatorischen und rotatorischen Fahrzeugträgheiten zurückzuführen ist und dessen Überwindung zu einer Beschleunigung des Fahrzeugs sowie dessen rotierenden Komponenten führt. Der Beschleunigungswiderstand errechnet sich mit Gleichung 4.23:

$$F_{\text{beschl}} = m \dot{v} + J \dot{\omega}. \quad (4.23)$$

Neben dem Fahrzeug selbst werden rotierende Fahrzeugkomponenten (z.B. Räder, Wellen, Kupplungen) beschleunigt. Die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  rotierender Komponenten ist bei konstanten Übersetzungsverhältnissen proportional zur Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$ , so dass sich die gemeinsame Betrachtung der Fahrzeugmasse  $m$  mit dem Trägheitsmoment  $J$  durch Einführung eines Massenfaktors  $\lambda$  etabliert hat:

$$F_{\text{beschl}} = \lambda m \dot{v}, \quad (4.24)$$

mit  $\lambda = \frac{m + m_{\text{equivTräg}}}{m} = 1 + \frac{m_{\text{equivTräg}}}{m}.$

Da nicht immer von konstanten Übersetzungsverhältnissen ausgegangen werden kann und das Trägheitsmoment  $J$  somit von Betriebszuständen abhängig ist, besonders vom eingelegten Gang bei Fahrzeugen mit Schaltgetrieben, ist folglich der Massenfaktor  $\lambda$  eine variable Kenngröße, die üblicherweise Werte aus dem Intervall  $\lambda = [1.1 \dots 1.5]$  annimmt [Pütz, 2012]. Die translatorisch

Tabelle 4.4.: Werte für den Massenzuschlag  $m_{\text{red}}/m = \lambda - 1$  in Abhängigkeit des eingelegten Gangs und des Fahrzeugtyps gemäß [Pütz, 2012]

Gang	PKW	Lastzug	Sattelzug	LKW
1	0.250	0.170	0.145	0.400
2	0.150	0.060	0.055	0.150
3	0.100	0.040	0.030	0.085
4	0.075	0.030	0.025	0.060
5	0.060	0.017	0.008	0.045

zu beschleunigende Ersatzmasse  $m_{\text{equivTräg}}$  errechnet sich aus dem Trägheitsmoment  $J$  und bildet dieses äquivalent auf eine translatorische Beschleunigung ab.

Der Beschleunigungswiderstand ist abhängig von

- der Fahrzeugmasse  $m$ , die auch die Masse der Beladung beinhaltet,
- der Fahrzeugbeschleunigung  $\dot{v}$  und
- dem Massenfaktor  $\lambda$ .

Alternativ zum Massenfaktor  $\lambda$  können, sofern bekannt,

- die Ersatzträgheitsmomente  $J_{\text{equiv}}$  aller intern rotierenden Elemente und
- deren Winkelbeschleunigung  $\dot{\omega}_{\text{equiv}}$  ( $\sim \dot{v}$ )

verwendet werden, was jedoch in einem weitaus komplizierteren Modell resultieren würde. Eine Übersicht zu gängigen Werten des Massenzuschlags  $m_{\text{red}}/m$  findet sich in Tabelle 4.4. Um die Variation des Massenzuschlags in einem Energiemodell zu berücksichtigen, erfordert folglich Kenntnis über das Schaltkennfeld des zugehörigen Fahrzeugs, welches bei verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen sowohl von der Fahrzeuggeschwindigkeit als auch von Drosselklappenstellung abhängt. Die Modellierung der Energiebedarfsvariation bei Fahrzeugen ohne Schaltgetriebe (z. B. Elektrofahrzeugen) bietet in dieser Hinsicht den Vorteil, dass der Massenzuschlag unter Vernachlässigung von Schlupf konstant ist.

#### 4.1.3.6. Energiebedarf von Nebenaggregaten

Nach einer Beschreibung der Komponenten, die für eine Fahrzeugbeschleunigung von der Zugkraft an den Rädern überwunden werden müssen, sind darüber hinaus weitere Nebenaggregate zu berücksichtigen, die im Sinne der Energieflussrichtung von Batterie zu Rädern vor der resultierenden Zugkraft des Fahrzeugs angeordnet sind. Dazu gehören sämtliche Fahrzeugkomponenten, die ihre Leistung entweder mechanisch vom Antriebstrang abnehmen (bspw. Lichtmaschine oder mechanische Ölpumpe in konventionellen Fahrzeugen) oder elektrisch vom Bordnetz beziehen (bspw. elektrische Pumpen oder Infotainment-System).

Da für diese Nebenaggregate üblicherweise deren Leistungsaufnahme  $P_{\text{neben}}$  spezifiziert ist, wird die für deren Betrieb erforderliche Energiemenge  $\Delta E_{\text{neben}}$  gemäß Gleichung 4.25 über das zeitliche Integral der Leistungsaufnahme bestimmt:

$$\Delta E_{\text{neben}} = \int P_{\text{neben}} dt. \quad (4.25)$$

Tabelle 4.5.: Werte für die Dauer- sowie kurzzeitige Maximalleistungsaufnahme von Nebenaggregaten gemäß [Linssen, 2012; Pucher et al., 2010; Robert Bosch GmbH, 2002]

<b>Nebenaggregat</b>	<b>Dauerleistung in W</b>	<b>max. Leistung in W</b>
Abblendlicht	50 – 150	150
Bremslicht	11 – 40	40
Servolenkung	24 – 28	1400
Bremskraftverstärker	70	70
Scheibenwischer	8 – 10	80
Heckscheibenwischer	5	65
Scheinwerfer-Waschanlage	14 – 60	60
Beheizbare Heckscheibe	60 – 120	200
Sitzheizung	12 – 200	180
Beheizbare Außenspiegel	30	56
Beheizbare Waschdüsen	40	40
Radio/CD-Wechsler	60	350
Gebläse Innenraum (max. Stufe)	80 – 500	460
Klimatisierung:		
Heizung Innenraum <b>oder</b>	300 – 1000	4000
Klimaanlage (heißer Sommertag)	1500 – 2000	4000
<b>Summe (bei PKW)</b>	<b>946</b>	<b>5625</b>

Für die Leistungsaufnahme von Nebenaggregaten sind in Tabelle 4.5 typische Werte aus [Linssen, 2012; Pucher et al., 2010] aufgelistet. Für den Energiebedarf von Nebenaggregaten wird  $P_{\text{neben}}$  oft über die gesamte Betriebsdauer hinweg aggregiert als Summe der Leistungsaufnahme aller Aggregate ohne einer weiteren Differenzierung betrachtet. Dies ist für die meisten Szenarien sinnvoll, da der summierte Energiebedarf von Nebenaggregaten im Vergleich zu den Fahrwiderständen untergeordnet ist. Für die Abschätzung von worst-case-Szenarien (z. B. heiße Sommer- oder kalte Wintertage) hingegen ist eine differenzierte Betrachtung einzelner Aggregate (z. B. Klimatisierung oder Heizung) sinnvoll, da diese unter gewissen Betriebs- und Umgebungsbedingungen einen wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf und somit auch auf die Reichweite von Fahrzeugen haben können. Im Kontext dieser Arbeit wird der summierte Energiebedarf von Nebenaggregaten betrachtet und für diese eine konstante Leistungsaufnahme angenommen.

#### 4.1.3.7. Übertragungsverluste

Die aus der Batterie entnommene Energiemenge kann nicht vollständig für die beschriebenen dissipativen sowie konservativen Anteile genutzt werden. Auf dem Weg der elektrischen und mechanischen Übertragung (z. B. in Wandlern sowie im Antriebsstrang) unterliegt sie weiteren Übertragungsverlusten.

In [Maia et al., 2011] wird zwischen zwei Betriebszuständen differenziert:

1. Motorbetrieb: Die Elektromaschine des Fahrzeugs wird als Motor betrieben und
2. Generatorbetrieb: Die Elektromaschine des Fahrzeugs wird als Generator betrieben.

Es werden dort nur mechanische Übertragungsverluste berücksichtigt und zwischen dem Wirkungsgrad des Motors  $\eta_m$  und dem übrigen mechanischen Antriebsstrang  $\eta_g$  differenziert. Die Wirkungsgrade werden jedoch in beiden Betriebspunkten gemäß Gleichung 4.26 stets kollektiv als Produkt betrachtet, das als Wirkungsgrad der gesamten Energieübertragung des Antriebsstrangs vom Motor bis zu den Rädern zu verstehen ist:

$$\Delta E_{\text{mot}} = \begin{cases} \frac{\Delta E_z}{\eta_m \eta_g} & \text{im Motorbetrieb und} \\ \Delta E_z \eta_m \eta_g & \text{im Generatorbetrieb.} \end{cases} \quad (4.26)$$

Die Energiemenge  $\Delta E_z$ , die die Elektromaschine für den Vortrieb von der Batterie erhalten muss bzw. aus dem Antrieb als Generator erzeugt, errechnet sich gemäß Gleichung 4.27 aus der für den Antrieb zu verrichtenden Arbeit bzw. dem Linienintegral aller Widerstandskräfte:

$$\Delta E_z = \int (F_{\text{luft}} + F_{\text{roll}} + F_{\text{kurve}} + F_{\text{steig}} + F_{\text{beschl}}) ds. \quad (4.27)$$

Die erforderliche Energiemenge für Nebenaggregate wird in [Maia et al., 2011] direkt ohne Berücksichtigung weiterer Verluste (wie bspw. in der Zuleitung, im Zwischenkreiskondensator, im DC/DC-Wandler etc.) aus der Batterie entnommen. Im Sinne des Energieflusses ist diese Annahme für Elektrofahrzeuge zulässig, weil Nebenaggregate aufgrund der fehlenden Verbrennungskraftmaschine<sup>(1)</sup> üblicherweise auf elektrischem Weg mit Energie versorgt werden.

Die Energiemenge  $\Delta E_{\text{bat}}$ , die aus der Batterie entnommen werden muss, errechnet sich gemäß Gleichung 4.28 aus der Summe der Energiemengen, die jeweils der Motor  $\Delta E_{\text{mot}}$  und die Nebenaggregate  $\Delta E_{\text{neben}}$  erfordern:

$$\Delta E_{\text{bat}} = \Delta E_{\text{mot}} + \Delta E_{\text{neben}}. \quad (4.28)$$

## 4.2. Herleitung eines diskreten Energiemodells

Bei der Entwicklung von Modellen ergibt sich oft das Dilemma über den notwendigen Detaillierungsgrad. Der überwiegende Anteil der in Abschnitt 4.1.3 vorgestellten Verluste und Widerstände wird in [Maia et al., 2011] berücksichtigt. Es werden jedoch, insb. bei der Modellierung des elektrischen Teilsystems, viele Effekte vernachlässigt. Dazu gehören bspw. die Verluste der elektrischen Wandlung und Übertragung. Konträr dazu stellt sich die Frage, welche der genutzten Fahrzeugparameter und -zustandsvariablen für die detailgetreue Nachbildung der Energievariation in Fahrzeugen dem Anwender bekannt sein werden und wie mit Hilfe dieser ohne detaillierte Fahrzeugsystemkenntnisse eine korrekte bzw. repräsentative Parametrierung vorgenommen werden kann.

Als Beispiel ist hier die in [Maia et al., 2011] eingeführte maximale Motorleistung zu nennen, mit der die Fahrzeugbeschleunigung von Fahrzeuginstanzen während einer laufenden Simulation begrenzt wird, sobald die für die vorherrschende Fahrzeugbeschleunigung erforderliche Motorleistung die maximale Motorleistung überschreitet. Bei einer vollständigen Modellierung

<sup>(1)</sup>Bei reinen Elektrofahrzeugen entfallen Komponenten, wie die Lichtmaschine zur Versorgung des Bordnetzes und die mechanische Ölpumpe zur Getriebebeschmierung, die bei konventionellen Fahrzeugen jeweils über die Antriebswelle angetrieben und deren kontinuierliche Versorgung über den Leerlaufregler der Verbrennungskraftmaschine gewährleistet wird. Das Bordnetz wird bei Elektrofahrzeugen über einen Gleichstromwandler von der Hochvolt-Traktionsbatterie versorgt. Bei dieser Wandlung kommt es jedoch zu Verlusten, die ggf. zu berücksichtigen sind.

müsste dieser Effekt auch beim *Rekuperieren* (regeneratives Bremsen) berücksichtigt werden, indem eine maximale generatorische Leistung des Motors eingeführt wird. Wird diese von der erforderlichen Bremsleistung überschritten, wird die restliche Bremsenergie über die mechanischen Bremsen in Wärme gewandelt. Beide Teilmodelle setzen detaillierte Parameterkenntnis voraus, um die Variation des Ladezustands in der Batterie korrekt nachzubilden. Während diese Variation mithilfe der Batteriespannung und des -stroms in einem Fahrzeug gemessen werden kann, muss sie in mikroskopischen Verkehrssimulationen aus Fahrzeugtrajektorien über ein inverses Fahrzeugmodell berechnet werden. Je detaillierter die Betrachtungen werden, desto mehr Annahmen müssen über neu eingeführte Zustandsgrößen getroffen werden. Ein Beispiel ist hierbei der im Getriebe eingelegte Gang. Dieser hat einen großen Einfluss auf den Fahrzeugenergiebedarf, ist jedoch sehr vom Fahrzeugzustand und vom Verhalten des Fahrers abhängig. Die Berücksichtigung dieses Parameters in einem Fahrzeugmodell würde Annahmen bei der Parametrierung erfordern. Jedoch würden neue Fehlerquellen eingeführt werden, da eine Parametrierung Kenntnisse über sowohl Fahrzeugtechnik als auch über das psychologische Fahrverhalten erfordern würde. In Anbetracht dessen, dass das hier zu entwickelnde Energiemodell in mikroskopischen Verkehrssimulationen Anwendung finden soll und es überwiegend an Verkehrs- und Energienetzplaner sowie -ingenieure gerichtet ist, können detaillierte Kenntnisse dieser Art nicht vorausgesetzt werden. Darüber hinaus sind die implementierten Berechnungen für alle relevanten Fahrzeuginstanzen in jedem Zeitschritt erforderlich. Üblicherweise erfolgt die Simulation mit einer Schrittweite von  $\Delta t = 1$  s. Besonders bei großen Szenarien sind daher effiziente Modelle erforderlich, um Simulationen mit den notwendigen Berechnungen auch bei einer großen Anzahl betrachteter Verkehrsmittel in absehbarer Zeit durchführen zu können. Daher wird in diesem Abschnitt ein Fahrzeugenergiemodell entwickelt, das mit nachvollziehbaren Basisparametern in der Lage ist, die Variation der Batterieenergiemenge mithilfe eines vereinfachten Modells realitätsgetreu nachzubilden. Die Modellgrundlagen werden in den Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2 vorgestellt, die sich jeweils dem mechanischen und dem elektrischen Teilmodell widmen. Es folgen in Abschnitt 4.2.3 eine Systemstruktur und die Darstellung der Energieflüsse in den jeweiligen Betriebszuständen. In Abschnitt 4.2.4 wird komplementär zum Energiebedarf auf die Modellierung der Energieversorgung durch Komponenten der Energieversorgungsinfrastruktur eingegangen, bevor in Abschnitt 4.2.5 die Parametrierung von Fahrzeug- und Versorgungsinfrastrukturobjekten vorgestellt wird. In Abschnitt 4.2.6 werden verbreitete Kenngrößen und Methoden der Modellvalidierung vorgestellt. Abschließend werden in Abschnitt 4.2.7 eine Auswertung und Gegenüberstellung zwei verschiedener Parametrierungen des Modells geboten.

#### 4.2.1. Mechanisches Teilmodell

Es handelt sich bei den folgenden Betrachtungen um ein zeitlich diskretes Modell. Aufgrund der energetischen Betrachtungen bietet sich eine Bilanzierung der einzelnen Energieanteile an. Dazu werden in jedem Zeit-/Rechenschritt deren Änderungen zwischen zwei konsekutiven Zeitpunkten  $t(k-1)$  und  $t(k)$  betrachtet. Die Messreihen müssen dabei nicht zwingend äquidistant sein. Es wird jedoch angenommen, dass die Schrittweiten klein sind, damit berücksichtigte Messgrößen mit einer hinreichend hohen Frequenz abgetastet werden und große Werteänderungen nicht unberücksichtigt bleiben.

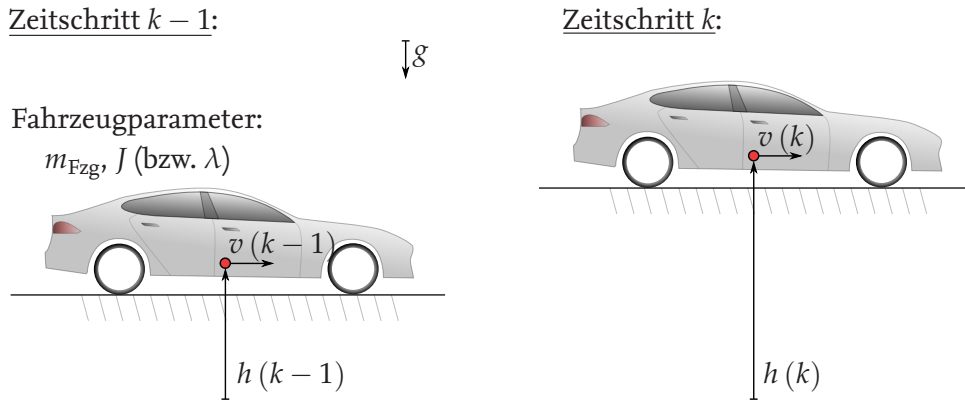


Abbildung 4.6.: Konservatives Teilmodell mit Darstellung relevanter Fahrzeugvariablen und -parameter

#### 4.2.1.1. Konservatives Teilmodell

Für die Veranschaulichung des konservativen Teilmodells sind in Abbildung 4.6 alle hierfür relevanten Fahrzeugvariablen und -parameter dargestellt. Das konservative Teilmodell beinhaltet alle Energieanteile, die keine Verluste darstellen und leitet sich aus den in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Beschleunigungs- und Steigungswiderständen her. Bei konservativen Systemen werden nur der Anfangs- ( $k - 1$ ) und Endzustand ( $k$ ) in einem Intervall betrachtet. Unter Annahme kleiner Schrittweiten wird die exakte Variation innerhalb eines betrachteten Intervalls vernachlässigt. Die Grundannahme bei der Modellierung des konservativen Teilmodells ist es, dass (zunächst unter Vernachlässigung dissipativer Energieanteile) die Änderung der potenziellen und kinetischen Fahrzeugenergie durch eine Energieentnahme aus bzw. Energierückspeisung in die Batterie begründet ist. Dabei wird die Vorzeichenkonvention eingeführt, nach der positive Energien ( $\Delta E > 0$ ) einem Energiefluss von Batterie in Richtung Antrieb und negative Energien ( $\Delta E < 0$ ) umgekehrt einem Energiefluss von Antrieb in Richtung Batterie entsprechen. Verluste der mechanischen und elektrischen Teilmodelle werden im dissipativen Teilmodell betrachtet. Die erforderliche Energie  $\Delta E_{\text{kons}}(k)$ , um ein betrachtetes Fahrzeug aus seinem Zustand zum Zeitpunkt  $k - 1$  in den Zustand zum Zeitpunkt  $k$  zu überführen, errechnet sich aus Gleichung 4.29:

$$\Delta E_{\text{kons}}(k) = \Delta E_{\text{kin,trans}}(k) + \Delta E_{\text{kin,rot}}(k) + \Delta E_{\text{pot}}(k). \quad (4.29)$$

Für die energetischen Betrachtungen wird ein Fahrzeug auf einen Massepunkt mit der Masse  $m_{\text{Fzg}}$  reduziert. Mit der momentanen Geschwindigkeit  $v$  errechnet sich die Änderung der kinetischen Energie aus der Translation zu:

$$\Delta E_{\text{kin,trans}}(k) = 1/2 m_{\text{Fzg}} (v^2(k) - v^2(k-1)). \quad (4.30)$$

Analog dazu werden alle rotierenden Komponenten eines betrachteten Fahrzeugs zu einem einzigen (Ersatz-)Massenträgheitsmoment  $J$  zusammengefasst. Mit dessen momentaner Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  kann nun die Änderung der kinetischen Energie aus der Rotation berechnet werden. Da die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  selten bekannt, nur umständlich zu ermitteln, jedoch proportional zur Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  ist, wird die Ersatzmasse  $m_{\text{equiv}}$  für die Trägheitsmomente rotierender Massen eingeführt, die als äquivalente, translatorisch zu



beschleunigende Masse aufgefasst werden kann. Die kinetische Energie aus der Rotation kann mit Gleichung 4.31 berechnet werden:

$$\Delta E_{\text{kin,rot}}(k) = \frac{1}{2} J (\omega^2(k) - \omega^2(k-1)) = \frac{1}{2} m_{\text{equivTräg}} (v^2(k) - v^2(k-1)). \quad (4.31)$$

Das Ersatzmassenträgheitsmoment  $m_{\text{equivTräg}}$  errechnet sich, sofern bekannt, aus dem in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Massenzuschlagsfaktor  $\lambda$ :

$$m_{\text{equivTräg}} = (\lambda - 1) m_{\text{Fzg}}. \quad (4.32)$$

Mit der Verwendung von Gleichung 4.31 werden die Annahmen getroffen, dass interne Übersetzungsverhältnisse in einem rein elektrisch betriebenen Fahrzeug für die Berechnung des Energiebedarfs konstant sind und darüber hinaus kein Schlupf auftritt. Um den Schlupf zu berücksichtigen, wären weitere Modelle und eine Schätzung der zugehörigen Parameter erforderlich, mit denen der Kontakt zwischen Fahrbahn und Reifen beschrieben wird. Weil diese im Verhältnis zu anderen Verlusten jedoch sehr gering sind, werden sie im Sinne der Rechenzeit vernachlässigt.

Die Änderung der potenziellen Energie errechnet sich mit der Fahrzeugmasse  $m_{\text{Fzg}}$ , der Erdbeschleunigung  $g$  und der momentanen Höhe  $h(k)$  des Fahrzeugs mit Gleichung 4.33:

$$\Delta E_{\text{pot}}(k) = m_{\text{Fzg}} g (h(k) - h(k-1)). \quad (4.33)$$

#### 4.2.1.2. Dissipatives Teilmodell

Nach der Variation der konservativen Fahrzeugenergie zwischen zwei Zeitpunkten müssen im Rahmen eines dissipativen Teilmodells Verluste zwischen den zwei betrachteten Zeitschritten berücksichtigt werden. Im Gegensatz zur Energiedifferenz  $\Delta E_{\text{kons}}$ , die im konservativen Teilmodell berechnet wird, ergeben sich die Verluste aus den in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Fahrwiderständen. Gemäß der eingeführten Konvention führen diese somit stets ein positives Vorzeichen, womit sich auch die Betragsbildungen in den folgenden Gleichungen begründen. In Gleichung 4.34 werden die Energieanteile des dissipativen Teilmodells zusammengefasst:

$$\Delta E_{\text{diss}}(k) = \Delta E_{\text{luf}}(k) + \Delta E_{\text{roll}}(k) + \Delta E_{\text{kurve}}(k). \quad (4.34)$$

Die einzelnen Energieanteile, die dabei aufgebracht werden müssen, ergeben sich aus dem Linienintegral der zugehörigen Fahrwiderstände. Diese werden im vorliegenden zeitdiskreten Modell durch eine numerische Integration des Fahrwiderstandes über die mit der Schrittweite zurückgelegten Strecke erzielt.

Der dissipative Energieanteil, den ein Fahrzeug aufgrund des in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Luftreibungswiderstands aufbringen muss, errechnet sich aus Gleichung 4.35:

$$\Delta E_{\text{luf}}(k) = |F_{\text{luf}}(k) v(k)| \Delta t = \frac{1}{2} c_w \rho_{\text{luf}} A_{\text{FzgStirn}} v(k)^2 |v(k)| \Delta t. \quad (4.35)$$

Durch die Betragsbildung bei der Geschwindigkeit wird gewährleistet, dass der durch schrittweise numerische Integration berechnete Energiebedarf durch Luftreibung monoton wachsend ist. Die Luftreibung, ebenso wie die restlichen Komponenten des dissipativen Teilmodells, erfordern

unabhängig von der Fahrtrichtung des betrachteten Fahrzeugs immer einen Energiefluss aus der Batterie in Richtung Antrieb und haben somit einen *Energiebedarf* zur Folge.

Ähnlich wie bei der Luftreibung, wird bei einem Fahrzeug durch den Rollreibungswiderstand zwischen Fahrbahn und Reifen Energie in nicht für den Antrieb weiter nutzbare Verformung der Reifen sowie Wärme gewandelt. Für dessen Überwindung muss eine Energie aufgebracht werden, die durch das numerische Integral des Rollreibungswiderstands über die in der jeweiligen Schrittweite zurückgelegte Strecke berechnet wird:

$$\Delta E_{\text{roll}}(k) = |F_{\text{roll}}(k) v(k)| \Delta t = c_{\text{roll}} m g \cos \varphi |v(k)| \Delta t. \quad (4.36)$$

Mit Gleichung 4.36 wird der resultierende Rollwiderstand des gesamten Fahrzeugs betrachtet, der sich aus der Summe der Widerstände an den einzelnen Reifen ergibt.

Während der Kurvenfahrt treten die in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Fahrwiderstände auf, die ebenfalls einen Energiebedarf zur Folge haben. Die Widerstandskraft errechnet sich mit Gleichung 4.21, die Kenntnis über die Gierrate  $\dot{\psi}$  sowie über die Schräglaufwinkel an Vorder- und Hinterrädern ( $\alpha_V$  und  $\alpha_H$ ) voraussetzt. Insbesondere die Ermittlung von Schräglaufwinkeln ist mit erheblichem Aufwand verbunden. Daher werden an dieser Stelle folgende Vereinfachungen und Annahmen getroffen: Die Schräglaufwinkel an Vorder- und Hinterrädern sind

1. gleich, d. h.  $\alpha_V = \alpha_H = \alpha$ ,
2. proportional zur Zentripetalkraft, so dass  $\alpha = c_{\text{kurve}} F_z = c_{\text{kurve}} \frac{mv^2}{r}$  gilt,
3. so gering, dass  $\sin(\alpha)$  mit  $\alpha$  approximiert wird und

der Fahrzeugschwerpunkt befindet sich mittig zwischen Vorder- und Hinterachse, so dass  $l_V = l_H = \frac{l}{2}$  gilt.

Mit diesen Annahmen kann die in Gleichung 4.21 eingeführte Kurvenwiderstandskraft gemäß Gleichung 4.37 vereinfacht werden:

$$F_{\text{kurve}} = m v \dot{\psi} \left( \frac{l_V}{l} \sin \alpha_H + \frac{l_H}{l} \sin \alpha_V \right) \approx c_{\text{kurve}} \frac{m^2 v^3}{r} \dot{\psi}. \quad (4.37)$$

Die Energie, die zur Überwindung des Kurvenwiderstands erforderlich ist, errechnet sich mit den bekannten Variablen Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  und Kurvenradius  $r$  aus Gleichung 4.38:

$$\Delta E_{\text{kurve}}(k) = |F_{\text{kurve}}(k) v(k)| \Delta t = c_{\text{kurve}} \frac{m^2 v^4(k)}{|r(k)|} |\dot{\psi}(k)| \Delta t. \quad (4.38)$$

#### 4.2.2. Elektrisches Teilmodell

Neben den mechanischen Anteilen benötigt ein Fahrzeug elektrische Energie, um Nebenaggregate mit der erforderlichen Leistung zu versorgen. Beispiele für diese Verbraucher und ihre Leistungsaufnahmen sind in Tabelle 4.5 aufgelistet. Diese Energie errechnet sich gemäß Gleichung 4.25 aus der zeitlichen Integration der aufgenommenen Leistung, die für ein zeitdiskretes Modell numerisch gemäß Gleichung 4.39 ermittelt wird:

$$\Delta E_{\text{neben}}(k) = P_{\text{neben}} \Delta t. \quad (4.39)$$

Da mit Gleichung 4.39 ein konstanter Leistungsbedarf  $P_{\text{neben}}$  für die Nebenaggregate angenommen wird, muss im Vorfeld eine Abschätzung über die Höhe des summierten mittleren Leistungsbedarfs von Nebenaggregaten getroffen werden. Dieser ist im Allgemeinen abhängig von der Tages- bzw. Jahreszeit, mit denen der maßgebliche Einfluss der Beleuchtung und der Klimatisierung sowohl des Innenraums als auch der Batterie auf den Energiebedarf bestimmt werden kann. Dabei sind stochastische Prozesse zu berücksichtigen, wie z.B. der Fahrgastwechselbedarf, der an kalten Winter- und warmen Sommertagen bei hohen Temperaturdifferenzen zwischen Fahrgastraum und Umgebung erhebliche Energieverluste durch häufiges Öffnen der Türen und den damit einhergehenden Wärmetausch zur Folge hat.

Unter Kenntnis der beschriebenen Energieanteile kann eine Energiemenge  $\Delta E_{\text{gain}}$  berechnet werden, die ein Fahrzeug während eines Zeitschrittes – je nach Vorzeichen – hinzugewinnt (Vorzeichen positiv: Rekuperation) oder abgibt (Vorzeichen negativ: Vortrieb). Diese Energiemenge errechnet sich mit Gleichung 4.40:

$$\Delta E_{\text{gain}}(k) = -\Delta E_{\text{kons}}(k) - \Delta E_{\text{diss}}(k) - \Delta E_{\text{neben}}(k). \quad (4.40)$$

Nachfolgend wird die Übertragung dieser Differenz von bzw. zur Batterie betrachtet, insb. die dabei auftretenden Übertragungsverluste. Dazu werden unterschiedliche Wirkungsgrade für Vortrieb  $\eta_{\text{vortr}}$  (Energiefluss von Batterie in Richtung Antrieb) und Rekuperation  $\eta_{\text{rekup}}$  (Energiefluss vom Antrieb in Richtung Batterie) eingeführt. Unter Berücksichtigung aller betrachteten Energieanteile ergibt sich das in den Gleichungen 4.41 und 4.42 dargestellte zeitdiskrete Modell für die Variation der Energiemenge in der Traktionsbatterie eines Fahrzeugs, in Abhängigkeit des Vorzeichens von  $\Delta E_{\text{gain}}$ :

$$E_{\text{bat}}(k) = E_{\text{bat}}(k-1) + \Delta E_{\text{gain}}(k) \eta_{\text{vortr}}^{-1} \quad \dots \text{ bei Vortrieb } (\Delta E_{\text{gain}} < 0) \text{ und} \quad (4.41)$$

$$E_{\text{bat}}(k) = E_{\text{bat}}(k-1) + \Delta E_{\text{gain}}(k) \eta_{\text{rekup}} \quad \dots \text{ bei Rekuperation } (\Delta E_{\text{gain}} > 0). \quad (4.42)$$

Es wird die Energiebilanz zwischen der konservativen Energiedifferenz, die ein Fahrzeug innerhalb eines Zeitschrittes hinzugewonnen hat, und der mechanischen sowie elektrischen Verluste gebildet. Die Differenz wird unter Berücksichtigung von Übertragungsverlusten bei Überschuss in die Traktionsbatterie des Fahrzeugs (Rekuperation) oder im Fall eines Defizits aus der Batterie in den Antrieb (Vortrieb) übertragen. In beiden Fällen wird die Energiemenge aus der Batterie entnommen bzw. zugeführt, die zur Einhaltung der aus der Trajektorie resultierenden Fahrzeugbewegung (unter Berücksichtigung der Fahrzeugparameter) erforderlich ist. Die Ergebnisse des Energiemodells haben keinen Einfluss auf die Fahrzeugbewegung.

Da dieses Modell für die Betrachtung des Energiebedarfs von Elektrofahrzeugen entwickelt wurde, sind die Übertragungsverluste hier als Teil des elektrischen Teilmodells eingeführt. Es ist denkbar, dieses Modell auch für verbrennungskraftmotorisch betriebene Fahrzeuge zu nutzen. Die Traktionsbatterie wäre in dem Fall als Kraftstofftank zu deuten und mit einer entsprechenden Energiemenge als Speicher zu parametrieren. Der Wirkungsgrad wäre bei Vortrieb  $\eta_{\text{vortr}}$  erheblich geringer als in typischen Elektrofahrzeugen und der Rekuperationswirkungsgrad  $\eta_{\text{rekup}}$  null. Da dieses Modell jedoch keine variablen Drehzahlübersetzungen berücksichtigt, wie sie in einem Fahrzeug mit Schaltgetriebe auftreten und diese invers aus Fahrzeugtrajektorien auch nur schwer abschätzbar sind, wären vorhergehende Analysen des Modells über die Genauigkeit

der Berechnungen erforderlich. In jedem Fall wäre mit Abweichungen zu rechnen, die über eine zeitliche und räumliche Mittelung der erforderlichen Fahrzeugenergien dennoch brauchbare Ergebnisse liefern könnten. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird das hier eingeführte Modell genutzt, um nach einer Parametrierung den Energiebedarf von (in einer mikroskopischen Verkehrssimulation) betrachteten Elektrofahrzeugen zu ermitteln.

### 4.2.3. Systemstruktur und Energieflüsse

Mit dem eingeführten Modell werden zwei Betriebszustände unterschieden:

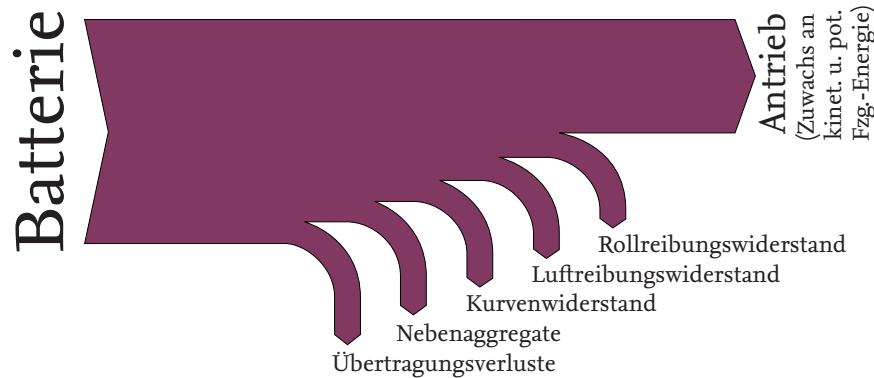
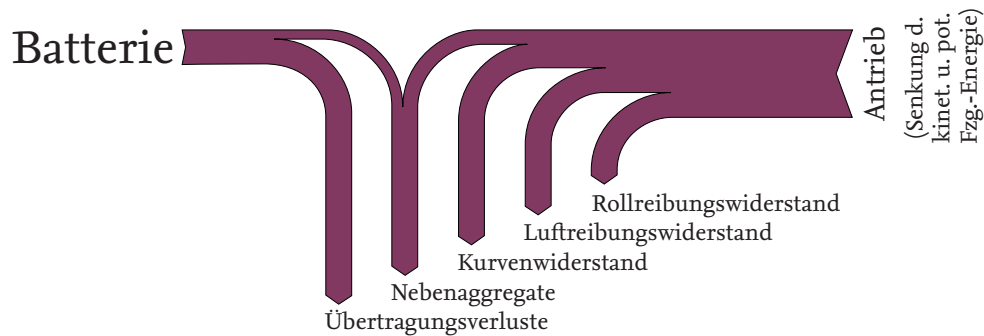
1. Vortrieb, die Batterie gibt Energie mit einer für den Vortrieb des Fahrzeugs erforderlichen Leistung ab, und
2. Rekuperation, die Batterie nimmt überschüssige Energie aus dem Antriebsstrang auf.

Sie unterscheiden sich von den in der Kraftfahrzeugtechnik üblichen Zuständen *Zug-* und *Schubbetrieb*. Dort ist eine Momentenbilanzierung auf dem Triebstrang üblich, um bspw. Schaltvorgänge unter variablen Antriebsmomenten komfortabel auszulegen. Bei diesen wird ein Freischnitt direkt an der Kurbelwelle zwischen Motor und (Schalt-)Getriebe betrachtet [Gerigk et al., 2005]. Da jedoch die meisten Elektrofahrzeuge kein Schaltgetriebe besitzen, werden diese in dem hier eingeführten Modell auch nicht modelliert. Wesentlich relevanter ist bei Elektrofahrzeugen der Energiefluss aus der Batterie heraus. Dieser beschriebene *Freischnitt* wird für das hier vorgestellte Modell direkt vor die Batterie gelegt. Der Energiefluss, der vorher in mechanischer Form als ein an den Antriebsstrang abgegebenes Antriebsmoment betrachtet wird, erfolgt nun in elektrischer Form als eine Energiemenge (messbar über den Strom und die Klemmenspannung), die der Batterie für den Vortrieb des Fahrzeugs entnommen oder aus dem Antrieb in die Batterie zurückgespeist wird. Es ergibt sich die bereits in Abschnitt 4.2.2 eingeführte Fallunterscheidung. Die resultierenden Energieflüsse in diesen Systemzuständen sind in den Abbildungen 4.7 bis 4.9 als Sankey-Diagramme dargestellt.

#### 4.2.3.1. Vortrieb

In Abbildung 4.7 ist der qualitative Energiefluss im Systemzustand *Vortrieb* gezeigt, wie es bspw. bei einer Fahrzeugbeschleunigung aus dem Stand der Fall wäre. Der Energiebedarf ist hoch, um das Fahrzeug zu beschleunigen. Die Energie wird vollständig aus der Batterie bereitgestellt und deckt neben dem Zuwachs der kinetischen (sowie ggf. der potenziellen) Fahrzeugenergie auch die Verluste mit ab.

In Abbildung 4.8 wird der Übergangsbereich dargestellt, der den erwähnten Unterschied zwischen der konventionellen Zug-/Schub-Betrachtung und der hier eingeführten Fallunterscheidung Vortrieb und Rekuperation verdeutlichen soll. Dieser Betriebszustand könnte sich einstellen, wenn bspw. ein Fahrzeug nach einer Beschleunigung anfängt leicht zu bremsen. Während dieser in konventioneller Betrachtung einen Schubbetrieb darstellt, da ein negatives Moment auf den Antriebsstrang wirkt, muss Energie aus der Batterie für den Betrieb von Nebenaggregaten (elektrisches Teilmodell) entnommen werden. Der Energiefluss ist von der Batterie in Richtung Antriebsstrang gerichtet, es handelt sich bei diesem Betriebszustand gemäß der hier eingeführten Konvention um den Fall *Vortrieb*. Die für Nebenaggregate erforderliche Energie wird aufgrund der Energiebilanzierung vor der Batterie zum Teil verlustfrei aus der zurückgewonnenen kinetischen

Abbildung 4.7.: Sankey-Diagramm der Energieflüsse bei Vortrieb ( $\Delta E_{\text{gain}} < 0$ )Abbildung 4.8.: Sankey-Diagramm der Energieflüsse bei Vortrieb ( $\Delta E_{\text{gain}} < 0$ ) im Schubbetrieb

und/oder potenziellen Energie bereitgestellt. Dies führt in erster Linie zu Abweichungen des Modells zum Realverhalten, ist jedoch der Einfachheit des Modells geschuldet. Der Energiebedarf der Nebenaggregate ist frei parametrierbar, im Vergleich zu anderen Komponenten jedoch verhältnismäßig gering, so dass die dadurch entstehenden Fehler oft vernachlässigbar sind.

#### 4.2.3.2. Rekuperation

Steigt die aus dem Antrieb zurückgewonnene Energie im generatorischen Betrieb der E-Maschine beim Bremsen weiter, kann diese in die Batterie gespeist werden. Das Energiemodell befindet sich nun im Betriebszustand *Rekuperation*. Die Energieflüsse folgen hierbei dem in Abbildung 4.9 dargestellten Sankey-Diagramm.

#### 4.2.4. Energiezufuhr

Komplementär zum Energiebedarf müssen Fahrzeuge mit der für ihren Betrieb erforderlichen Energie versorgt werden. Eine Energieversorgungsinfrastruktur besteht aus Ladestellen, die jeweils die Funktion der Energiebereitstellung übernehmen und eine Übertragung ermöglichen, sofern alle betrieblichen Voraussetzungen dafür gegeben sind.

Grundsätzlich müssen sich Fahrzeuge an einer definierten Position auf (bzw. in der Umgebung) einer jeweiligen Ladestelle befinden. Die Position von simulierten Verkehrsmitteln wird in SUMO in relativer Form durch den Fahrstreifen angegeben, auf dem sich diese befinden, sowie durch deren Längsposition entlang des jeweiligen Fahrstreifens. Ladestellen werden daher mit dem Bezeichner

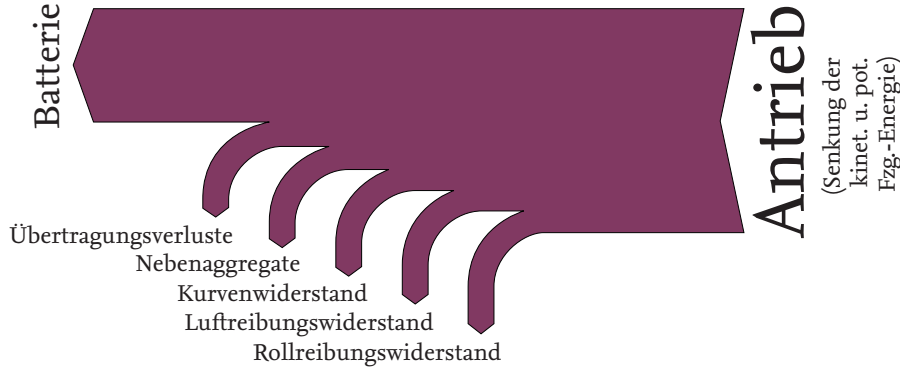


Abbildung 4.9.: Sankey-Diagramm der Energieflüsse bei Rekuperation ( $\Delta E_{\text{gain}} > 0$ )

des Fahrstreifens, sowie einer Start- und Endposition attribuiert. Erst wenn sich ein Fahrzeug innerhalb dieses definierten Bereichs befindet, kann eine Energieübertragung erfolgen.

Außerdem müssen betriebliche Vorbedingungen für eine Energieübertragung erfüllt sein. Derzeitige Ladestellen erfordern überwiegend ein stillstehendes Fahrzeug in ihrer näheren Umgebung, bevor die Energieübertragung beginnen kann. Es ist jedoch denkbar, dass künftig Energieversorgungsinfrastrukturen in Betrieb genommen werden, die aus länger segmentierten Ladestellen bestehen, auf denen Fahrzeuge auch während der Fahrt (dynamisch,  $v_{\text{Fzg}} \neq 0$ ) geladen werden können. Erste Prototypen solcher Ladesysteme zur Energieversorgung von Straßenbahnen mittels induktiver Energieübertragung wurden bereits erfolgreich umgesetzt und erprobt [Meins und Graffam, 2011]. Nachdem ein Fahrzeug eine Ladestelle mit der für die Energieübertragung erforderlichen Geschwindigkeit erreicht hat, sind betriebliche Maßnahmen zu treffen, bevor die Energieübertragung beginnen kann. Dazu zählen bspw. die Anmeldung zur Autorisierung der Energieübertragung, das Stecken eines Ladesteckers durch den Benutzer (bei konduktiven Ladesystemen) oder das Herabsenken einer Sekundärspule (bei induktiven Ladesystemen). Betrieblich lassen sich diese systemspezifisch erforderlichen Prozesse durch Einführung einer Dauer berücksichtigen, die vergeht, bevor die Energieübertragung beginnen kann.

Nach Beginn der Energieübertragung erfolgt diese mit den spezifizierten Parametern *Ladeleistung*  $P_{\text{Laden}}$  und *Wirkungsgrad*  $\eta_{\text{Laden}}$ . Der Energiegehalt in der Batterie (bzw. im Tank) unterliegt der in Gleichung 4.43 definierten Variation:

$$E_{\text{Bat}}(k) = E_{\text{Bat}}(k-1) + P_{\text{Laden}} \eta_{\text{Laden}} \Delta t. \quad (4.43)$$

#### 4.2.5. Parametrierung

Ein Vorteil des hier eingeführten, zeitdiskreten Energiemodells ist, dass es durch die getroffenen Vereinfachungen verglichen mit ähnlichen Modellen wesentlich geringere Anforderungen an die Rechenleistung stellt. Darüber hinaus werden für die Berechnungen (selbst für Fachfremde) physikalisch/kinematisch nachvollziehbare Parameter genutzt. Dieses Energiemodell ist in SUMO implementiert, um die Berechnung des Energiebedarfs von Fahrzeugen in mikroskopischen Verkehrssimulationen zu ermöglichen [DLR, 2015].



Tabelle 4.6.: Parameter des vorgestellten Energiemodells

Parameter	Bezeichnung in SUMO	Formelzeichen	Default
maximaler Energiegehalt d. Batterie	MaxBatKap	$E_{\text{Bat,max}}$	0 kWh
Fahrzeugmasse	Mass	$m_{\text{Fzg}}$	0 kg
Ersatzmasse rotier. Elemente	InternalMomentOfInertia	$m_{\text{equiv}}$	0 kg
Fahrzeugstirnfläche	FrontSurfaceArea	$A_{\text{FzgStirn}}$	0 m <sup>2</sup>
Luftwiderstandskoeffizient	AirDragCoefficient	$c_w$	0 [-]
Rollreibungskoeffizient	RollDragCoefficient	$c_{\text{roll}}$	0 [-]
Kurvenwiderstandskoeffizient	RadialDragCoefficient	$c_{\text{kurve}}$	0 $\frac{\text{s}^2}{\text{kg m}}$
Leistungsaufnahme Nebenaggregate	ConstantPowerIntake	$P_{\text{neben}}$	0 W
Wirkungsgrad Vortrieb	PropulsionEfficiency	$\eta_{\text{vortr}}$	0 [-]
Wirkungsgrad Rekuperation	RecuperationEfficiency	$\eta_{\text{rekup}}$	0 [-]

#### 4.2.5.1. Fahrzeugobjekte

Zur Parametrierung von Verkehrsmitteln, deren Energiebedarf mit dem vorgestellten Modell ermittelt werden soll, stehen Nutzern die in Tabelle 4.6 aufgelisteten Parameter zur Verfügung. In der rechten Spalte sind die Werte und Einheiten aller Fahrzeugparameter aufgelistet, mit denen simulierte Verkehrsmittel bei der Nutzung des Energiemodells in SUMO instanziiert werden, sofern sie vom Nutzer nicht anders angegeben werden.

Das Energiemodell ist in Form eines Devices in SUMO implementiert. Die Parametrierung erfolgt mit der Fahrzeugtypendeklaration, wie sie beispielhaft im Listing A.9 im Anhang dargestellt ist. Jeder Fahrzeugtyp hat einen eigenen Parametersatz. Um die Modellberechnungen durchzuführen, muss das Battery-Device in der Konfigurations-Datei eines SUMO Szenarios instanziiert werden. Dazu müssen in der Konfigurationsdatei einer Simulation unter dem Attribut `output` die xml-Tags `battery-output` (Name der Ausgabedatei), `battery-output.precision` (Anzahl der Nachkommastellen; optional) und `device.battery.probability` (Wahrscheinlichkeit für die Instanzierung eines Fahrzeugs mit dem Energiemodell und für die Durchführung der vorgestellten Berechnungen) analog zum beispielhaften Listing A.23 deklariert werden. Zuletzt muss bei der Instanzierung relevanter Fahrzeugobjekte ein Anfangswert für den Energiegehalt der Batterie festgelegt werden. Dies erfolgt gemäß des exemplarischen Listings A.11 durch Angabe des Attributs `ActBatKap`. Wird kein Anfangswert angegeben, bekommen Fahrzeugobjekte den Default-Wert  $E_{\text{Bat,max}}/2$  zugewiesen.

Die Datenausgabe erstreckt sich sowohl über die Zeit (mit einer Auflösung von einer Sekunde) als auch über die deklarierten Fahrzeuge in diesen Zeitschritten. Sie beinhaltet somit pro Zeitschritt und Fahrzeug alle für den Energiebedarf relevanten Informationen, sowie betriebliche Daten, die für eine Optimierung der Ladepunkte einer Energieversorgungsinfrastruktur erforderlich sind. Um die Struktur der Ausgabedatei zu verdeutlichen, ist in Listing A.24 der beispielhafte Ausschnitt einer Ausgabedatei gezeigt.

#### 4.2.5.2. Komponenten der Ladeinfrastruktur

Die Energieversorgungsinfrastruktur, bestehend aus örtlich verteilten Ladestellen, muss mit zugehörigen Parametern deklariert werden. Neben ihrer Anordnung und ihren betrieblichen

Tabelle 4.7.: Parameter der eingeführten Klasse `chargingStation` zur Definition von Ladestellen in SUMO

Parameter	Bezeichnung in SUMO
eindeutiger Bezeichner der Ladestelle	<code>id</code>
Fahrstreifen, auf dem sich die Ladestelle befindet	<code>lane</code>
Startposition der Ladestelle auf dem Fahrstreifen	<code>startPos</code>
Endposition der Ladestelle auf dem Fahrstreifen	<code>endPos</code>
Ladeleistung, mit der an dieser Ladestelle Energie an Fahrzeuge übertragen wird (in W)	<code>chrgpower</code>
Wirkungsgrad der Energieübertragung an dieser Ladestelle (0...1)	<code>efficiency</code>
Parameter, der festlegt, ob Fahrzeuge bei $v = 0 \text{ km/h}$ geladen werden sollen (0...nein, 1...ja)	<code>chargeInTransit</code>
Dauer (in s), bis Energieübertragung nach erfüllten Vorbedingungen (Fahrzeug auf Ladestelle und optional $v_{\text{Fzg}} = 0 \text{ km/h}$ ) beginnt	<code>chargeDelay</code>

Parametern zur Energieübertragung sind die Leistung, mit der die Energieübertragung erfolgt, sowie der Wirkungsgrad der Energieübertragung entscheidend. In Tabelle 4.7 sind alle Parameter der neu eingeführten Klasse `chargingStation` aufgelistet. Eine beispielhafte Definition von Ladestellen in SUMO findet sich im Anhang unter Listing A.7.

#### 4.2.5.3. Parameteridentifizierung

Die Parametrierung und Validierung des vorgestellten Modells erfolgte zweistufig im Rahmen der Projekte *emil* und *InduktivLaden*. In der ersten Stufe zu Beginn des Projektes *emil*, als dieses Modell entwickelt wurde, existierten noch keine Messungen über die Leistungsaufnahme aus dem realen Linienbetrieb mit den dafür vorgesehenen Fahrzeugen und Komponenten. Die einzige Möglichkeit zur Parametrierung und Validierung des Modells bestand daher darin, die Ausgabe einer von Bombardier Transportation durchgeführten Simulation zu nutzen. Dieser Simulation liegt ein Modell zugrunde, welches das Fahrzeug in einem weitaus tieferen Detaillierungsgrad nachbildet, indem mehr Komponenten sowie Betriebszustände berücksichtigt werden, als es in dem hier eingeführten Modell der Fall ist. Dieses detaillierte Modell des Herstellers konnte aus Gründen der Geheimhaltung nicht offengelegt werden und hätte zudem im Fall seiner Implementierung in ein mikroskopisches Verkehrssimulationswerkzeug erheblich höhere Anforderungen an Rechenleistung sowie Simulationsdauer zur Folge gehabt. Es wird daher der in Abbildung 4.10 dargestellte Ansatz verfolgt, nur die Simulationsein- und -ausgänge von Bombardier Transportation zu nutzen, um die zwei Modelle miteinander zu vergleichen. Der Eingangsvektor  $\underline{u}(k)$ , der Fahrzeuggeschwindigkeit und weitere Messgrößen beinhaltet, wird neben dem unbekannten (Black Box-Simulations-)Modell des Herstellers dem hier entwickelten Modell  $\hat{f}(\underline{u}, \hat{\theta})$  übergeben. In der anschließenden Parameteridentifikation wird ein Fehlermaß, der sich aus der Differenz der Systemausgänge  $\underline{y}$  (Hersteller) und  $\hat{\underline{y}}$  (eigenes Modell) zusammensetzt, durch Variation der Modellparameter  $\hat{\theta}$  unter Einhaltung zulässiger Wertebereiche einem lokalen Minimum zugeführt. Zur Identifikation optimaler Parameter wird dieses Fehler- bzw. Gütemaß als

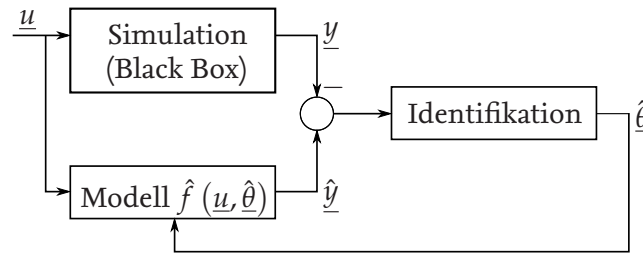


Abbildung 4.10.: Prinzipielles Vorgehen bei der Parameteridentifikation des nichtlinearen Fahrzeugmodells

die Summe des quadratischen Fehlers zwischen den Ausgängen der Referenzsimulation und des hier entwickelten Modells definiert. Ziel ist, dass das Verhalten des hier eingeführten Modells durch geeignete Parametrierung möglichst genau das Verhalten des Referenzmodells widerspiegelt. In Gleichung 4.44 wird diese Optimierungsaufgabe mathematisch formuliert, welche in der MATLAB-Funktion `lsqcurvefit` implementiert ist:

$$\min_{\hat{\theta}} \sum_k \left( \hat{f}(\underline{u}(k), \hat{\theta}) - y(k) \right)^2 = \min_{\hat{\theta}} \sum_k (\hat{y}(k) - y(k))^2. \quad (4.44)$$

Im Rahmen dieser Parameteridentifikation werden alle Modellparameter  $\hat{\theta}$  variiert, die nicht aus Datenblättern oder Spezifikationen bekannt sind. Im Projekt *emil* zählten hierzu die folgenden Parameter:

- Die Ersatzmasse rotierender Elemente  $m_{\text{equiv}}$ ,
- der Rollreibungskoeffizient  $c_{\text{roll}}$ ,
- die summierte Leistungsaufnahme von Nebenaggregaten  $P_{\text{neben}}$ ,
- der Vortriebswirkungsgrad  $\eta_{\text{vortr}}$  und
- der Rekuperationswirkungsgrad  $\eta_{\text{rekup}}$ .

Nach Inbetriebnahme der ersten Fahrzeuge und mit Beginn der Aufzeichnung von Betriebsmessdaten konnten in einer zweiten Stufe nicht nur das Simulationsmodell mit realem Fahrzeugverhalten verglichen, sondern auch die Parameter des Modells angepasst werden. Es zeigte sich dabei, dass das entwickelte Modell nach einer optimierten Parametrierung in der Lage ist, das Verhalten der Energievariation in der Batterie im Fahrzeugmodell des Herstellers sowie in Fahrzeugmessungen mit sehr hoher Genauigkeit nachzubilden. Zwei exemplarische Verläufe sind in Abbildung 4.11 (Modell links, Messung rechts) dargestellt.

#### 4.2.6. Modellvalidierung

Die Abweichungen eines Modells und die Güte einer Parametrierungen kann unter verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet werden. Dazu wird in [Detering, 2011] eine Übersicht zu gängigen Fehlermaßen geboten, die einen Vergleich zwischen zwei (bspw. empirischen und simulierten) Zeitreihen ermöglichen. In den folgenden Abschnitten wird eine Auswahl relevanter Fehlermaße vorgestellt und die Eignung des entwickelten Energiebedarfsmodells und der jeweils optimalen Parametrierung anhand dieser Maße bewertet.

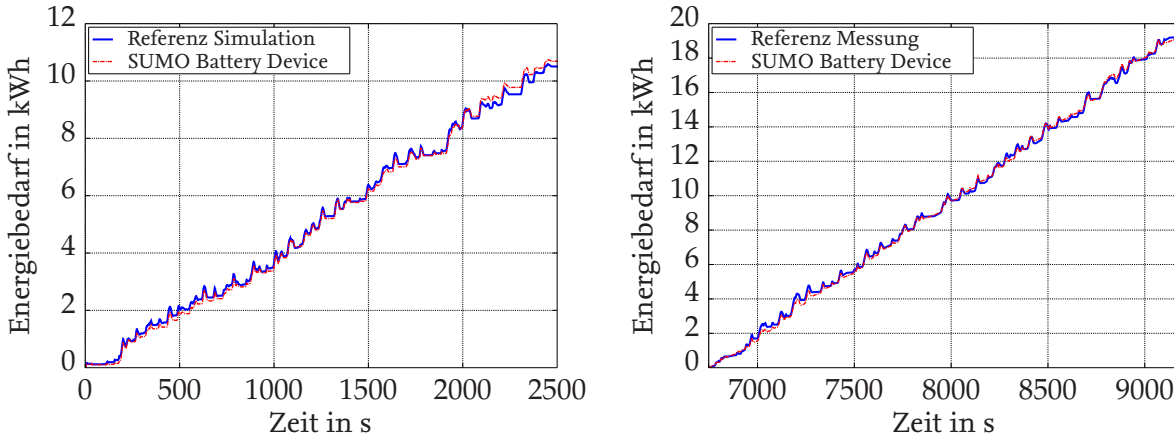


Abbildung 4.11.: Validierung des Energiemodells auf Grundlage einer Simulation des Herstellers (links) und auf Grundlage erhobener Messdaten aus dem Realbetrieb (rechts)

#### 4.2.6.1. Quantil-Quantil-Diagramm

Das Quantil-Quantil-Diagramm (engl.: quantile-quantile-Plot, kurz: qq-Plot) ist ein grafisches Validierungsverfahren. Ziel einer Modellierung ist es, dass entwickelte Modelle nach Möglichkeit alle relevanten Effekte berücksichtigen und die berechneten Größen die ursprünglichen Messwerte mit minimalem Fehler nachbilden. Jeder modellierte Prozess besitzt jedoch Abweichungen, deren Beseitigung ab einem gewissen Detaillierungsgrad mehr Kosten als Nutzen zur Folge haben und mit steigender Modellkomplexität zu einer *Überparametrierung* führen können [Walter, 2008]. Oft müssen daher Anforderungen an die Abweichungen des Modells zur Realität formuliert werden, bspw. in Form einer zulässigen Streuung oder einer Abweichung des Erwartungswerts.

Für diesen Zweck erlaubt das qq-Diagramm den grafischen Vergleich zweier beliebiger Merkmale miteinander, wie bspw. Modell- und Messwerte, indem diese gegeneinander aufgetragen werden. Dabei wird angestrebt, dass im qq-Diagramm eine Gerade erscheint. Ein häufiger (und auch namensgebender) Anwendungsfall ist, dass die *Quantile* eines Modellfehlers (Abweichung eines Modells zu Messwerten) oder eines beliebigen anderen Merkmals gegen die Quantile einer bestimmten Verteilungsfunktion aufgetragen werden. Um die angestrebte Verteilung des Fehlers zu bestätigen (z. B. Normalverteilung mit dem Erwartungswert  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma$ ), müssen die Werte auf einer Geraden mit der Steigung 1 liegen.

#### 4.2.6.2. Mittlerer quadratischer Fehler

Der mittlere quadratische Fehler (engl.: mean squared error, kurz: MSE) sowie dessen Wurzel (engl.: root mean squared error, kurz: RMSE) sind zwei sehr weit verbreitete Fehlermaße ([FGSV, 2006]), die sich unter Nutzung der eingeführten Signalbezeichnungen mit Gleichungen 4.45 und 4.46 errechnen:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\hat{y}(k) - y(k))^2, \quad (4.45)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\hat{y}(k) - y(k))^2}. \quad (4.46)$$

Parameter  $n$  ist dabei die Länge der Vektoren  $\underline{y}$  und  $\underline{\hat{y}}$  und entspricht der Anzahl der beinhalteten

Werte. Ziel bei der Rekonstruktion eines Signals mit einem Modell ist ein möglichst kleiner Fehler und somit ein geringer Wert für den RMSE. Ein Vorteil des RMSE ist, dass durch die Quadrierung des Fehlers betragsmäßig große Abweichungen stärker gewichtet werden. Nachteil hingegen ist, dass der Wertebereich des RMSE nicht begrenzt ist und eine objektive Bewertung von Ergebnissen in vielen Fällen nur schwer möglich ist.

#### 4.2.6.3. Korrelationskoeffizient

Der Korrelationskoeffizient  $r_c$  wird (u. a. in [Hartung et al., 2005]) als ein Maß zur Quantifizierung des linearen Zusammenhangs zwischen zwei Kenngrößen beschrieben und ist definiert durch:

$$r_c = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \frac{(\hat{y}(k) - \bar{\hat{y}})(y(k) - \bar{y})}{\sigma_{\hat{y}(k)} \sigma_{y(k)}}. \quad (4.47)$$

Die Parameter  $\bar{y}$  und  $\sigma_y$  stehen für den arithmetischen Mittelwert und die Standardabweichung eines Vektors  $y$ . Vorteil bei Anwendung des Korrelationskoeffizienten ist, dass dessen Wertebereich sich über das Intervall  $[-1, 1]$  erstreckt. Bei Werten von  $+1$  bzw.  $-1$  liegen vollständig positiv bzw. negativ lineare Zusammenhänge vor. Für den Korrelationskoeffizienten ergibt sich im Fall zwei identischer Signale  $r_c = 1$ . Besteht überhaupt kein linearer Zusammenhang zwischen zwei Signalen, so ergibt sich für den Korrelationskoeffizienten  $r_c = 0$ . Im vorliegenden Anwendungsfall der Parameteroptimierung wird ein höchstmöglicher linearer Zusammenhang angestrebt. Hierbei ergibt sich jedoch auch einer der Nachteile bei Anwendung des Korrelationskoeffizienten: Bei einem vollständig linearen Zusammenhang kann nicht automatisch auf eine Gleichheit der Signale geschlossen werden, da deren Steigungen sowie die Anfangswerte bei  $r_c = 1$  durchaus verschiedene Werte annehmen können. Zusätzlich ist für dessen Berechnung ein erhöhter Rechenaufwand erforderlich, da hierfür die Mittelwerte und die Standardabweichungen der geprüften Signale ermittelt werden müssen. Vorteil für die objektive Bewertung von Ergebnissen ist der begrenzte Wertebereich des Korrelationskoeffizienten.

#### 4.2.6.4. Ungleichheitskoeffizient nach Theil

Die Anpassungsgüte zweier Zeitreihen lässt sich weiter mit dem Ungleichheitskoeffizienten nach Theil (engl.: Theil's inequality coefficient) [Theil, 1967] gemäß Gleichung 4.48 bewerten:

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\hat{y}(k) - y(k))^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\hat{y}(k))^2 + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y(k))^2}}. \quad (4.48)$$

Der Wertebereich des Ungleichheitskoeffizienten nach Theil liegt im Intervall  $[0, 1]$ . Stimmen zwei verglichene Signale vollständig überein, ergibt sich  $U = 0$ . Ein Ergebnis von  $U = 1$  spricht hingegen für eine schlechte Anpassung. Vorteil ist der begrenzte Wertebereich des Ungleichheitskoeffizienten, um die objektive Bewertung einer Anpassung zu ermöglichen. Darüber hinaus bietet der Ungleichheitskoeffizient nach Theil weitere Analysemöglichkeiten, die im Folgenden vorgestellt werden.

Der Zähler des Ungleichheitskoeffizienten nach Theil in Gleichung 4.48 entspricht der in Abschnitt 4.2.6.2 vorgestellten Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers, deren Radikand (der

MSE) nach der in [Detering, 2011] (unter Abschnitt 9.1.6) durchgeführten Rechnung in die drei Koeffizienten gemäß Gleichung 4.49 zerlegt werden kann:

$$MSE = (\bar{\hat{y}} - \bar{y})^2 + (\sigma_{\hat{y}} - \sigma_y)^2 + 2(1 - r_c) \sigma_{\hat{y}} \sigma_y,$$

$$1 = \underbrace{\frac{(\bar{\hat{y}} - \bar{y})^2}{MSE}}_{U_m} + \underbrace{\frac{(\sigma_{\hat{y}} - \sigma_y)^2}{MSE}}_{U_s} + \underbrace{\frac{2(1 - r_c) \sigma_{\hat{y}} \sigma_y}{MSE}}_{U_c}. \quad (4.49)$$

Aufgelöst ergeben sich Gleichungen 4.50 bis 4.52 zur Berechnung dieser drei Koeffizienten:

$$U_m = \frac{(\bar{\hat{y}} - \bar{y})^2}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\hat{y}(k) - y(k))^2}, \quad (4.50)$$

$$U_s = \frac{(\sigma_{\hat{y}} - \sigma_y)^2}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\hat{y}(k) - y(k))^2}, \quad (4.51)$$

$$U_c = \frac{2(1 - r_c) \sigma_{\hat{y}} \sigma_y}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\hat{y}(k) - y(k))^2}. \quad (4.52)$$

Die Werte der Koeffizienten geben an, auf welche Effekte der mittlere quadratischer Fehler zurückzuführen ist.

- Der Mittelwertanteil  $U_m$  (engl.: bias proportion) bewertet den Anteil des Fehlers, der auf unterschiedliche Mittelwerte der beiden Signale  $\hat{y}$  und  $y$  zurückzuführen ist. Für eine möglichst gute Rekonstruktion des Referenzsignals sollte  $U_m = 0$  angestrebt werden.
- Der Varianzanteil  $U_s$  (engl.: variance proportion) bewertet den Anteil des Fehlers, der auf unterschiedliche Varianzen der beiden Signale  $\hat{y}$  und  $y$  zurückzuführen ist. Für eine möglichst gute Rekonstruktion des Referenzsignals sollte hier ebenfalls  $U_s = 0$  angestrebt werden.
- Der Kovarianzanteil  $U_c$  (engl.: covariance proportion) bewertet den Anteil des Fehlers, der auf die Abwesenheit eines linearen Zusammenhangs zurückzuführen ist und gibt dadurch Aufschluss über unsystematische Fehler. Für eine möglichst gute Rekonstruktion des Referenzsignals sollte hier  $U_c = 1$  angestrebt werden.

#### 4.2.6.5. Residuenanalyse

Bei der Residuenanalyse handelt es sich um ein grafisches Validierungsverfahren, bei dem die Verteilung oder der zeitliche Verlauf des Fehlers  $\hat{y}(k) - y(k)$  grafisch untersucht wird, um die Qualität eines Modells, einer Modellparametrierung oder einer Regression zu bewerten. Es kann als grafisches Komplement zu den in Abschnitt 4.2.6.4 mit dem Ungleichheitskoeffizienten nach Theil eingeführten Mittelwert-, Varianz- und Kovarianzanteilen des Fehlers aufgefasst werden.

In Abbildung 4.12 sind in der oberen Reihe drei beispielhafte Signale mit zugehörigen Regressionskurven sowie in der unteren Reihe das jeweilige Histogramm ihrer Fehler dargestellt. Die Unterscheidung der drei Komponenten und ihrer qualitativen Auswirkungen auf die Ausprägung dieser Verteilung ist in den drei Spalten ( $U_m$  links,  $U_s$  mittig,  $U_c$  rechts) dargestellt.



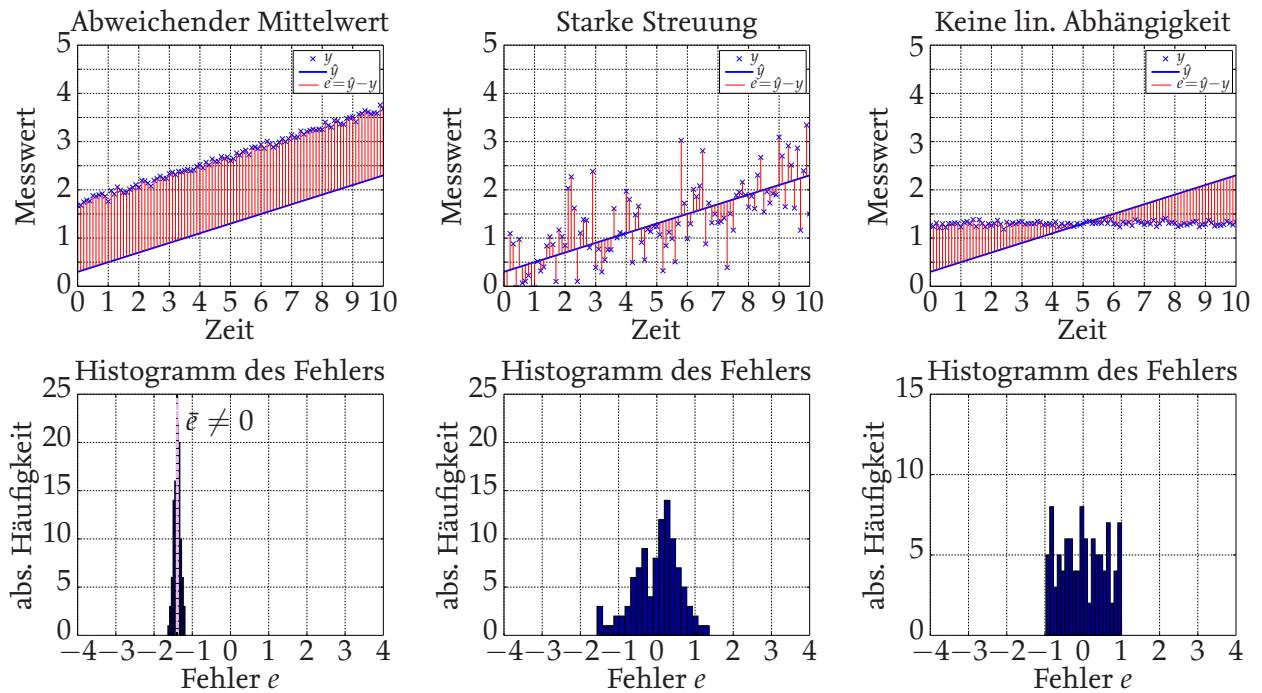


Abbildung 4.12.: Grafische Gegenüberstellung der Fehleranteile  $U_m$ ,  $U_s$  und  $U_c$  eines parametrisierten Modells (in diesem Fall ein Polynom erster Ordnung) im Rahmen einer Residuenanalyse

#### 4.2.7. Gegenüberstellung der Ergebnisse und Auswertung

Zur Bewertung des Modells und dessen Parametrierung werden die in Abbildung 4.11 dargestellten Energieverläufe mit den beschriebenen Validierungsmethoden untersucht und dafür die entsprechenden Kennwerte berechnet und Diagramme erstellt. In Tabelle 4.9 werden die Ergebnisse gegenübergestellt, die mit den ermittelten optimalen Parametern aus Tabelle 4.8 an einem beispielhaften Fahrzeugumlauf erzielt werden konnten.

Ein Vergleich der zeitlichen Verläufe des Energiebedarfs zeigt, dass sich das entwickelte Modell nach einer optimierten Parametrierung trotz der getroffenen Vereinfachungen für die Berechnung des Energiebedarfs in Elektrofahrzeugen und deren Batterien eignet. Auch die eingeführten grafischen Validierungsverfahren sowie Fehlermaße zeigen, dass das entwickelte Modell nur geringe Abweichungen des Energiebedarfs zu Messwerten aufweist. Während die Werte der eingeführten Fehlermaße für eine sehr gute Nachbildung des Energiebedarfs sprechen, zeigt die grafische Validierung des Modells insb. beim Vergleich mit dem Referenzmodell des Herstellers (Tabelle 4.9, linke Spalte) einen ungewöhnlichen Verlauf des Histogramms der Abweichung, sowie ein qq-Diagramm, das eine Normalverteilung des verbleibenden Modellfehlers ausschließt. Diese Ergebnisse sprechen für einen systematischen Fehler, der im entwickelten Modell unberücksichtigt bleibt. Mögliche Gründe hierfür können sein:

1. Es wird eine konstante Leistungsaufnahme von Nebenaggregaten  $P_{\text{neben}}$  angenommen und somit die Regelung der Fahrzeuginnenraumtemperatur durch die Klimatisierung und deren Abhängigkeit von den Fahrgastwechseln und von der Umgebungstemperatur des Fahrzeugs vernachlässigt.
2. Es wird eine konstante Fahrzeugmasse  $m_{\text{Fzg}}$  angenommen, die jedoch während eines

Tabelle 4.8.: Optimierte Modellparameter für die Nachbildung des Energiebedarfs mit dem vorgestellten Energiemodell in der Referenzsimulation des Herstellers und der Referenzmessung

<b>Modellparameter</b>	<b>Parametrierung für Referenzsimulation</b>	<b>Parametrierung für Referenzmessung</b>	<b>Bem.</b>
$E_{\text{Bat,max}}$	90 kWh	90 kWh	*
$m_{\text{Fzg}}$	17 500 kg	17 500 kg	*
$m_{\text{equiv}}$	0.0 kg	946.247 kg	
$A_{\text{FzgStirn}}$	7.268 m <sup>2</sup>	7.268 m <sup>2</sup>	*
$c_w$	0.600	0.600	*
$c_{\text{roll}}$	0.010	0.011	
$P_{\text{neben}}$	356.807 W	13.733 kW	
$\eta_{\text{votr}}$	0.850	0.950	
$\eta_{\text{rekup}}$	0.850	0.850	

\*Parameterwert ist aus Datenblättern und Spezifikationen bekannt

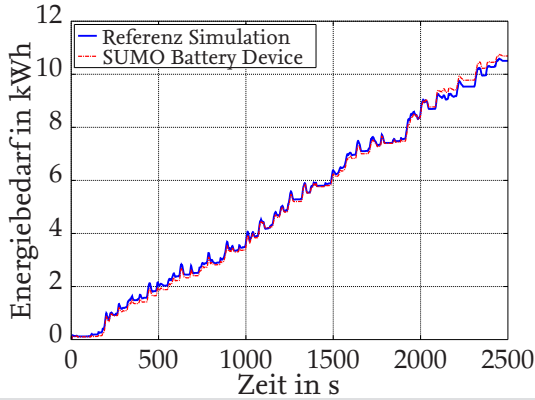
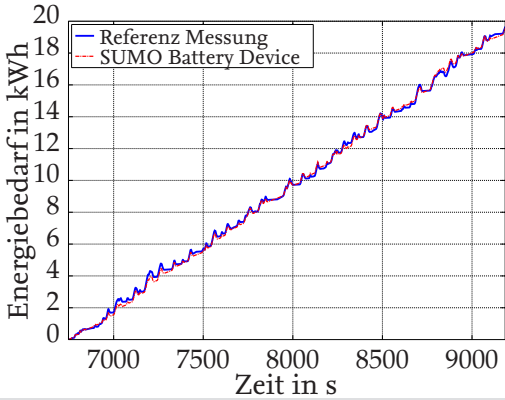
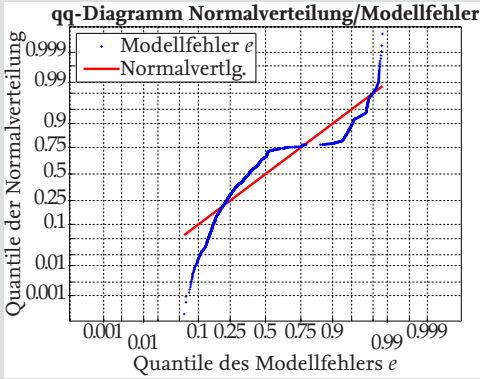
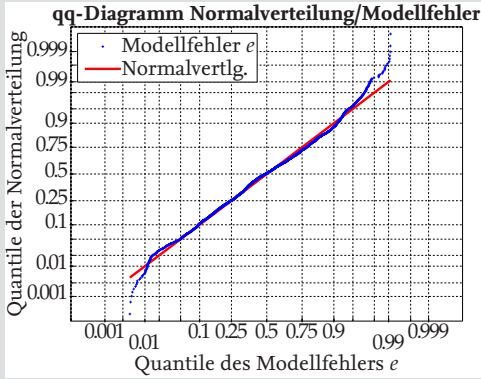
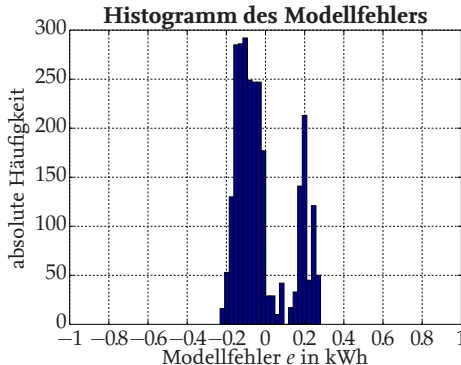
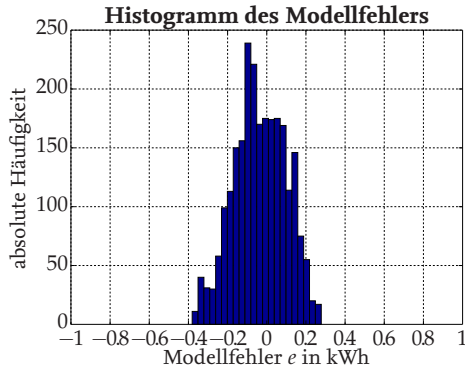
Fahrzeugumlaufs im öffentlichen Verkehrsbetrieb durch Fahrgastwechsel deutlich variieren kann und bspw. über die Ersatzmasse rotierender Elemente  $m_{\text{equiv}}$  korrigiert werden könnte.

3. Einer der festen Parameter (in Tabelle 4.8 mit \* gekennzeichnet) ist falsch angegeben, so dass dessen Abweichung über die restlichen zu variierenden Parameter korrigiert wird.

Diese Abweichungen werden über eine Anpassung der Parameter korrigiert, diese hat jedoch Abweichungen vom wahren Verlauf der einzelnen Energieanteile zur Folge. Der nahezu normalverteilte Modellfehler bei der Rekonstruktion der Referenzmessung spricht nicht zwingend gegen einen systematischen Fehler. Die Annahme eines normalverteilten Fehlers vereinfacht jedoch dessen Handhabung in gegebenenfalls erforderlichen statistischen Analysen.

Die Implementierung dieses Modells, die in [Kurczveil et al., 2014] vorgestellt wird, ist seit der Veröffentlichung von SUMO Version 0.24.0 vom 02. September 2015 Bestandteil der SUMO-Distribution [Behrisch et al., 2015]. Es wird im Rahmen dieser Arbeit genutzt, um den Energiebedarf von entsprechend parametrisierten und instanziierten Verkehrsmitteln auf Grundlage ihrer Trajektorien in mikroskopischen Verkehrssimulationen mit SUMO zu ermitteln.

Tabelle 4.9.: Gegenüberstellung von grafischen und analytischen Ergebnissen der Modellvalidierung gegen Referenzsimulation des Herstellers (linke Spalte) sowie gegen Referenzmessung (rechte Spalte)

	Vergleich Modell mit Referenzsimulation	Vergleich Modell mit Referenzmessung
Verlauf		
qq-Diagramm		
Wurzel d. mittleren quadrat. Fehlers	$RMSE = 0.1371 \text{ kWh}$	$RMSE = 0.1369 \text{ kWh}$
Korrelationskoeffi- zient	$r_c = 0.9996$	$r_c = 0.9998$
Theils Ungleich- heitskoeffizient	$U = 0.0105$	$U = 0.0061$
→ Mittelwertanteil	$U_m = 0.0244$	$U_m = 0.0647$
→ Varianzanteil	$U_s = 0.5400$	$U_s = 0.1824$
→ Kovarianzanteil	$U_c = 0.4356$	$U_c = 0.7529$
Residuen- analyse		



# 5 Optimierung der Anordnung von Energieversorgungsinfrastrukturen

Die Optimierung einer Ladestellenanordnung für den urbanen Straßenverkehr, die eine ausreichende Versorgung darin befindlicher Fahrzeuge mit Energie gewährleistet, erfordert detaillierte Kenntnis über die Verkehrsinfrastruktur sowie Informationen über den Verkehrsbetrieb und dessen Teilnehmer. Zum einen sind potenzielle Standorte, sog. Kandidaten, der Verkehrswegeinfrastruktur zu wählen, die für die Positionierung von Komponenten einer Energieversorgungsinfrastruktur in Frage kommen, zum anderen sind Informationen über den Betrieb und das Verhalten der betrachteten Verkehrsmittel erforderlich. Es müssen die für den Betrieb benötigten Energien sowie die Aufenthaltsorte der Fahrzeuge bekannt sein, um diese Informationen mit den Kandidaten der Verkehrsinfrastruktur im Rahmen einer Optimierung in geeignete Relation zu setzen.

Hierfür wird in diesem Kapitel eine Optimierungsmethodik vorgestellt. In Abschnitt 5.1 werden die erforderlichen Grundlagen eingeführt, wobei die Schwerpunkte auf der *linearen Programmierung* zur Formulierung mathematischer Probleme und auf der Vorstellung grundlegender Lösungskonzepte für deren Optimierung liegen. Nachfolgend werden in Abschnitt 5.2 bisherige Ansätze der Standortoptimierung vorgestellt, die sich mit der optimalen Verortung von Kundendienstanlagen, wie bspw. Komponenten einer Energieversorgungsinfrastruktur befassen. Im letzten Teil dieses Kapitels wird sich im Abschnitt 5.3 der Vorstellung eines Optimierungsverfahrens und eines -modells gewidmet, die im Wesentlichen auf Informationen über die Infrastruktur und den Verkehrsbetrieb beruhen. Dabei werden die in Kapitel 4 vorgestellte Berechnung des Energiebedarfs von Fahrzeugen sowie die erforderlichen Prozesse zur Energieübertragung berücksichtigt.

## 5.1. Grundlagen der Optimierung

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen für die Erarbeitung eines Optimierungsverfahrens vorgestellt. In Abschnitt 5.1.1 wird zunächst auf die formalisierte Beschreibung von mathematischen Problemen bzw. Optimierungsaufgaben eingegangen. In Abschnitt 5.1.2 wird ein Überblick über Konzepte und grundsätzliche Algorithmen für die Lösung von Optimierungsaufgaben geboten. Zuletzt wird in Abschnitt 5.1.3 mit dem Simplex-Algorithmus ein gängiges Lösungsverfahren für Probleme vorgestellt, die in Form von linearen Programmen definiert sind.

### 5.1.1. Lineare Programmierung

In der Mathematik werden Optimierungsaufgaben oft als Probleme bezeichnet, die es zu formulieren und zu lösen gilt. Die meisten erfordern dabei die Minimierung oder Maximierung eines Gütefunktional unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen, wie z. B. die Verfügbarkeit von Ressourcen und ihre Auswirkungen auf das Optimierungsziel. Lassen sich Zielfunktion und Nebenbedingungen jeweils als lineare Funktion und lineare Un-/Gleichung(en) in Abhängigkeit ihrer zu optimierenden Variablen formulieren, spricht man von einem *linearen Programm*. Die lineare Programmierung wurde für die Optimierung von logistischen Abläufen und Plänen (z. B. Einsatzplanungen sowie Stunden- und Trainingsplänen) des US Militärs entwickelt, worauf sich das Wort (mathematisches) *Programm* in diesem Kontext bezieht. Der Begriff *Programmierung* im Sinne der Computer-Programmierung wurde erst später geprägt. Die lineare Programmierung hat sich in Kombination mit dem in [Dantzig, 1951] veröffentlichten Simplex-Algorithmus als wesentliches Verfahren im Gebiet des *Operations Research* etabliert [Nickel et al., 2014].

Die Grundproblemstellung lautet, dass (zulässige) Werte für Entscheidungsvariablen  $\underline{x}$  bestimmt werden müssen, mit denen  $f(\underline{x})$  maximiert wird, gleichzeitig jedoch auch Nebenbedingungen  $\underline{g}(\underline{x})$  eingehalten werden. Die Elemente des Kostenvektors  $\underline{c}$  wichten dabei den Einfluss der Entscheidungsvariablen  $\underline{x}$  auf die Zielfunktion. Mit den Elementen der Matrix  $A$  hingegen werden die zu betrachtenden Systemeigenschaften (z. B. Produktionsrate, Ressourcenverfügbarkeit, etc.) in Abhängigkeit der Entscheidungsvariable  $\underline{x}$  definiert und durch  $\underline{b}$  nach oben oder unten begrenzt. Die mathematischen Formulierungen hierfür sind in den Gleichungen 5.1 bis 5.3 gegeben:

Matrixform:	Standardform:	
$\max f(\underline{x})$	$\max \underline{c}^\top \underline{x}$	$\max c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$
so dass $\underline{g}(\underline{x}) \leq \underline{b}$	so dass $A\underline{x} \leq \underline{b}$	so dass $a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$
		$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$
		$\vdots$
		$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$
und $\underline{x} \geq 0$	und $\underline{x} \geq 0$	und $x_1 \geq 0$
		$x_2 \geq 0$
		$\vdots$
		$x_n \geq 0.$

(5.1)

(5.2)

(5.3)

Mit der Zielfunktion (Gleichung 5.1) wird ein  $n$ -dimensionales (lineares) Skalarfeld beschrieben, dessen Maximum ermittelt werden soll. Mit den Nebenbedingungen 5.2 und 5.3 werden  $m$  Hyperebenen definiert, die (bei Ungleichungen) dieses Skalarfeld jeweils in eine zulässige und unzulässige Hälfte teilen oder (bei Gleichungen) die Analyse des Skalarfeldes auf die definierten Hyperebenen bzw. deren Schnittmengen reduzieren: Es entsteht ein Polytop. In Abbildung 5.1 (links) wird die geometrische Interpretation eines linearen Programms veranschaulicht, in dem fünf Ungleichungen ( $m = 5$ ) das zu analysierende Skalarfeld auf ein zweidimensionales Polygon ( $n = 2$ ) eingrenzen.

Die Mächtigkeit der linearen Programmierung zeigt sich mit ihrer breiten Anwendung in sehr vielen Bereichen der Wirtschaft und Wissenschaft, in denen eine Optimierung



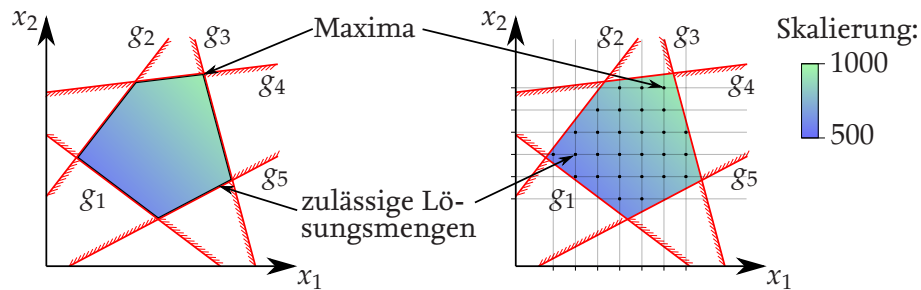


Abbildung 5.1.: Geometrische Interpretation eines linearen Programms (links; zulässiger Lösungsraum ist schwarz umrandet) und eines gemischt ganzzahligen linearen Programms (rechts; zulässige Lösungen sind mit schwarzen Punkten gekennzeichnet) am Beispiel eines mit fünf Ungleichungen  $g$  begrenzten ( $m = 5$ ) zweidimensionalen Skalarfeldes ( $n = 2$ )

erforderlich ist [Bazaraa et al., 2011; Cormen et al., 2009; Nickel et al., 2014; Zimmermann, 2005]. Unter Voraussetzung einer korrekten Modellierung erlaubt die lineare Programmierung eine sehr elegante Analyse komplexer Systeme, um das Systemverständnis sowie die Qualität von Entscheidungen (z.B. Investitionen) zu erhöhen. Eine weitere sehr häufig verwendete Möglichkeit zur Formulierung von Optimierungsproblemen ist die Verallgemeinerung von linearen Programmen: Gemischt ganzzahlige lineare Programme (engl.: mixed integer linear program, kurz: MILP) erlauben die zusätzliche Einführung von Ganzzahligkeitsbedingungen für ausgewählte Entscheidungsvariablen. Die geometrische Interpretation eines Beispiels wird in Abbildung 5.1 (rechts) veranschaulicht. Da lineare Zusammenhänge in manchen Fällen nur auf die Linearisierung eines Systems um einen Arbeitspunkt zurückzuführen sind, stellen nichtlineare Programme eine Alternative dar, bei der jedoch die Entwicklung einer allgemeingültigen Theorie nicht so weit fortgeschritten ist, wie bei der linearen Programmierung. Die Vielfalt der verfügbaren Algorithmen zur Lösung vieler nichtlinearer Programme ist sehr groß, dennoch existiert kein pauschales Lösungsverfahren, wie der Simplex-Algorithmus für lineare Programme [Zimmermann, 2005]. Die Formulierung nichtlinearer Programme erfordert in den meisten Fällen die gleichzeitige Entwicklung eines Lösungsalgorithmus.

### 5.1.2. Konzeptionelle Lösungsstrategien für Optimierungsaufgaben

Für die Lösung von Optimierungsaufgaben werden heuristische Suchverfahren eingesetzt. Die Ziele dieser Suchverfahren sind, dass sie (1.) auf dem kürzestmöglichen Weg (2.) das globale Optimum ermitteln. Die Forderung nach dem kürzesten Weg schließt in den meisten Fällen eine vollständige Enumeration aller Lösungsmöglichkeiten aus; mit verfügbaren Rechenleistungen ist die vollständige Enumeration häufig nicht realisierbar. Aufgrund der Komplexität vieler Probleme kann auch die Forderung nach einem globalen Optimum nicht immer erreicht werden. Viele Ergebnisse sind plausibel, stellen jedoch nur eine Approximation des globalen Optimums dar. Die Entwicklung eines Suchverfahrens geht oft mit einem Nachweis über die Optimalität des Suchweges und die Qualität der Ergebnisapproximation einher.

Ein wesentliches Merkmal der Suchverfahren ist ihre Rechendauer, bis ein Ergebnis ermittelt wird. Dabei werden *effiziente* Suchverfahren angestrebt, die eine Lösung in einer polynomialen Rechendauer ermöglichen. Das bedeutet, dass die Algorithmen bei  $n$  Eingangsgrößen eine

Rechendauer der Ordnung  $O(n^k)$  erfordern, mit  $k = \text{konst.}$  Darüber hinaus existieren Suchverfahren, die eine superpolynomialer Rechendauer erfordern (bspw. eine exponentielle Rechendauer der Ordnung  $O(k^n)$ , mit  $k = \text{konst.}$ ). Andere Suchverfahren hingegen liefern selbst in beliebig endlicher Dauer überhaupt keine Lösung, wie bspw. das in [Turing, 1936] vorgestellte *Halteproblem*. Bei der Betrachtung von Optimierungsproblemen und der erforderlichen Rechendauer für ihre Lösung werden die Komplexitätsklassen NP und P eingeführt [Cormen et al., 2009]. Wohingegen für Probleme aus der Komplexitätsklasse P Algorithmen existieren, die eine Lösung in polynomialer Rechendauer ermöglichen, kennzeichnen sich die Probleme in NP dadurch, dass (bisher) weder ein Algorithmus mit polynomialer Lösungsdauer, noch ein Beweis erbracht werden konnte, dass kein solcher Algorithmus existieren kann. Viele Probleme in NP konnten im Laufe der Zeit, mit der Entwicklung optimierter Algorithmen, in P überführt werden. Die Forschungsfrage, ob für *alle* in NP ein Algorithmus mit polynomialer Rechendauer existiert (kurz:  $P \neq NP$ ), wird in [Cook, 1971] und [Levin, 1973] formuliert und beschäftigt die theoretische Informatik sowie Mathematik seither. Sie ist eine der wichtigsten offenen mathematischen Fragestellungen der heutigen Zeit [Cormen et al., 2009] und gewinnt aufgrund der rasant wachsenden Datenmengen unserer Gesellschaft immer mehr an Bedeutung.

Die Anordnung von Ladestellen ist eine kombinatorische Optimierungsaufgabe und gehört, wie das Problem des Handlungsreisenden<sup>(1)</sup>, zur Klasse der Standortprobleme. Diese werden meist in Form eines gemischt ganzzahligen linearen Programms formuliert und sind somit NP-schwer [Papadimitriou, 1981]. Das bedeutet, dass die Optimalität einer gefundenen Lösung nicht in polynomialer Rechendauer geprüft werden kann und eine entsprechende Prüfung für viele existierende Probleme selbst unter Annahme utopischer Rechenleistungen sehr schnell in Größenordnungen anwächst, die das Alter unseres Sonnensystems mehrfach übersteigen. Dennoch haben sich für die meisten kombinatorischen Optimierungsprobleme Verfahren etabliert, die in endlicher Zeit in der Lage sind ein *hinreichend gutes* Ergebnis zu approximieren oder die Suche so stark einzugrenzen, dass ein globales Optimum ermittelt werden kann. In [Wegele, 2005] wird ein Überblick zu etablierten Optimierungskonzepten geboten. Das prinzipielle Vorgehen bei allen Algorithmen ist die systematische Auswertung eines diskreten (in vielen Fällen binären) Entscheidungsbaums, durch den sich mit definierten Regeln des verwendeten Suchverfahrens entlang seiner Äste fortbewegt wird, bis eine *optimale* Lösung ermittelt werden kann. Suchverfahren gliedern sich in deterministische und stochastische Algorithmen und werden in den folgenden Abschnitten kurz beschrieben. Für eine Ausführung der theoretischen Grundlagen wird hier auf die Arbeiten [Cormen et al., 2009; Korte und Vygen, 2012; Ottmann und Widmayer, 2012; Schöning, 2001] verwiesen.

#### 5.1.2.1. Der Greedy-Algorithmus

Der Greedy-Algorithmus ist ein deterministischer Suchalgorithmus und vergleichbar mit dem Gradientenverfahren, bei dem auf der Suche nach einem Optimum (Minimum oder Maximum) Funktionswerte des Gütefunktional schrittweise in Richtung des minimalen oder maximalen Anstiegs ausgewertet werden [Cormen et al., 2009; Schöning, 2001]. Diese Strategie wird schrittweise fortgeführt, bis keine Verbesserung des Wertes mehr zu erzielen ist. Der Greedy-Algorithmus hat

<sup>(1)</sup>Das Problem des Handlungsreisenden (engl.: Traveling Salesman Problem, kurz: TSP) besteht aus der Ermittlung der günstigsten Route, mit der eine bestimmte Anzahl von festgelegten Orten besucht werden kann.

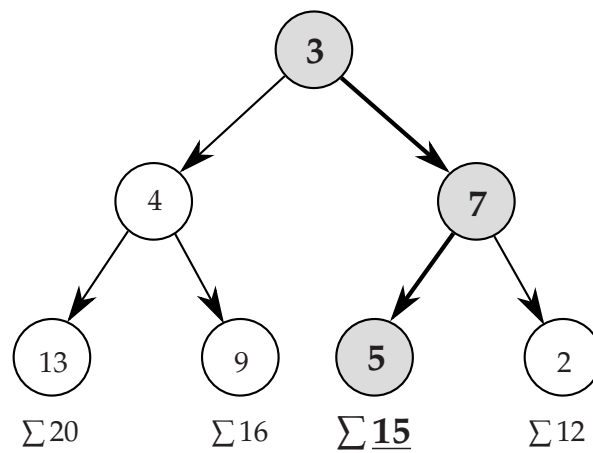


Abbildung 5.2.: Beispiel eines Suchablaufs mit Greedy-Algorithmus bei einem Maximierungsproblem: die Wahl fällt bei jedem Suchschritt (an den Verzweigungen) auf den größten Wert.

jedoch im Gegensatz zum Gradientenverfahren aufgrund der endlich diskreten Lösungsmenge in jedem Schritt nur eine begrenzte Auswahlmöglichkeit. Von den verfügbaren Möglichkeiten trifft er zum aktuellen Zeitpunkt der Auswertung die für ihn beste Entscheidung; er *nimmt sich das größte (bzw. kleinste) Stück*, wodurch sich der Name des Algorithmus *greedy* (deutsch: gierig) begründet. Entscheidungen, die vorher bereits getroffen wurden oder künftig noch getroffen werden müssen, bleiben dabei unberücksichtigt. Als Beispiel wird in Abbildung 5.2 der Suchablauf eines Greedy-Algorithmus durch einen Entscheidungsgraphen eines binären, linearen Programms gezeigt. Das Ziel der Suche ist es, die Summe entlang der Knoten zu maximieren. Bei der Suche mit einem Greedy-Algorithmus werden die grau hinterlegten Knoten als Pfad zum Optimum ( $\Sigma 15$ ) ermittelt.

Es ist ersichtlich, dass bei der Anwendung eines Greedy-Algorithmus je nach Startpunkt die Möglichkeit besteht, dass dieser nur ein lokales Optimum eines Problems findet. Globale Optima finden Greedy-Algorithmen ausschließlich in *glatten* Räumen, sog. Matroiden [Schöning, 2001]. Die Vorteile des Algorithmus hingegen liegen darin, dass er schnell konvergiert, weil er nur entlang eines Pfades durch den Suchbaum iteriert. Das breite Anwendungsspektrum des Greedy-Algorithmus bei Optimierungsaufgaben liegt nicht zuletzt an seiner einfachen Implementierbarkeit. Eine Verbesserung des Greedy-Algorithmus kann erzielt werden, wenn während der Suche (bspw. nach Erreichen eines lokalen Optimums) auch schlechtere Entscheidungen in Kauf genommen werden, wie es bspw. bei stochastischen Suchverfahren der Fall ist [Wegele, 2005].

#### 5.1.2.2. Der Branch-and-Bound-Algorithmus

Der Branch-and-Bound-Algorithmus wird in [Land und Doig, 1960] eingeführt und ist neben dem Greedy-Algorithmus ein sehr weit verbreiteter deterministischer Suchalgorithmus, der bei vielen Optimierungsproblemen Anwendung findet. Dessen Vorgehen ähnelt dem Greedy-Algorithmus, da bei der Suche entlang des Entscheidungsbaums auch hier die jeweils lokal beste Wahl getroffen wird. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass die Ergebnisse bereits getroffener Entscheidungen gespeichert werden und im Laufe der Auswertungen der Versuch unternommen wird, den Entscheidungsbaum und dadurch die zu treffenden Entscheidungen (engl.: branch)

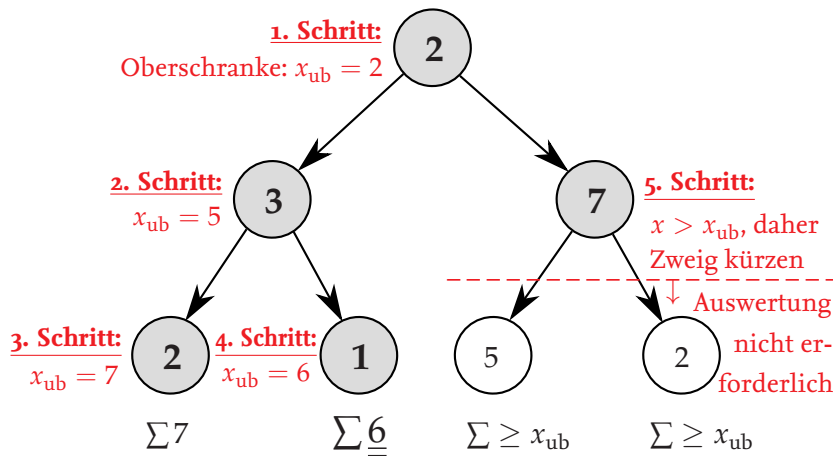


Abbildung 5.3.: Beispiel eines Suchablaufs basierend auf dem Branch-and-Bound-Algorithmus bei einem binären Minimierungsproblem mit zwei Variablen

weitestgehend zu reduzieren. Das Ziel ist es durch Bildung und Auswertung von Ober- bzw. Unterschranken (engl.: bounds), unplausible (Unter-)Zweige zu erkennen, die nicht mehr zu einem globalen Optimum führen können. Die Suche (auch entlang alternativer Zweige rückwärtig gelegener Knoten) wird jedoch so lange durchgeführt, bis alle (noch) plausiblen Zweige vollständig evaluiert werden. Es wird die vollständige Enumeration eines Entscheidungsbaums simuliert, ohne alle Möglichkeiten tatsächlich einzeln betrachten zu müssen [Korte und Vygen, 2012].

Der Branch-and-Bound-Algorithmus liefert immer ein globales Optimum und ist für viele NP-schwere kombinatorische Optimierungsprobleme die beste Wahl, besonders zur Lösung ganzzahliger linearer Programme. Dennoch ist die Anzahl der auszuwertenden Knoten sehr stark vom vorliegenden Problem abhängig, weil es zahlreiche Probleme gibt, bei denen sich der Entscheidungsbaum kaum reduzieren lässt. Eine Optimierung, der in diesem Fall ein Branch-and-Bound-Algorithmus zugrunde liegt, dauert erheblich länger als es bei einer Suche basierend auf dem Greedy-Algorithmus der Fall wäre.

In Abbildung 5.3 wird das prinzipielle Vorgehen des Branch-and-Bound-Algorithmus im Fall eines Minimierungsproblems mit zwei Variablen verdeutlicht. Die Wahl fällt bei jedem Suchschritt (an den Verzweigungen) auf den kleinsten Wert. Es wird zunächst der linke Zweig (2; 3; 2) vollständig evaluiert und für das Optimum eine vorübergehende Oberschranke (engl.: upper bound) von  $x_{ub} = 7$  festgelegt. Damit wird festgehalten, dass für das Optimum  $x_{opt} \leq 7$  gelten muss. Der unterste Knoten des Zweiges rechts daneben (2; 3; 1) wird anschließend ausgewertet. Dadurch, dass die Summe des Zweiges mit 6 unter der aktuellen vorübergehenden Oberschranke 7 liegt, wird auch die vorübergehende Oberschranke des Optimums auf  $x_{ub} = 6$  reduziert. Es gilt nun  $x_{opt} \leq 6$ . Die zwei rechten Zweige (2; 7; 5 und 2; 7; 2) müssen unter Kenntnis der vorübergehenden Unterschranke nur noch bis zum zweiten Knoten mit dem Wert 7 ausgewertet werden. Weil deren Summe bis dahin ( $2 + 7 = 9$ ) oberhalb der aktuellen vorübergehenden Oberschranke 6 liegt, kann keiner dieser Zweige einen besseren Wert liefern. Die Suche kann beendet werden und die vorübergehende Oberschranke  $x_{ub} = 6$  ist das globale Optimum des Problems.

Eine Verbesserung des Branch-and-Bound-Algorithmus kann erzielt werden, indem dieser mit dem in [Kelley, 1960] vorgestellten Schnittebenenverfahren zum Branch-and-Cut-

Algorithmus kombiniert wird [Grötschel und Holland, 1991; Padberg und Rinaldi, 1991]. Im Schnittebenenverfahren wird dazu mit einer LP-Relaxierung die Ganzzahligkeitsbedingung des zugrundeliegenden gemischt ganzzahligen linearen Programms aufgehoben, wodurch auf Ober- bzw. Unterschranken für die optimale Lösung geschlossen werden kann. Dies führt zu einem stark reduzierten Suchbereich, der anschließend mit dem Branch-and-Bound-Algorithmus ausgewertet werden muss [Nemhauser und Wolsey, 1988; Schrijver, 1986; Wolsey, 1998].

### 5.1.2.3. Evolutionäre Algorithmen

Evolutionäre Algorithmen gliedern sich in zwei verbreitete Verfahren, deren Ansätze sich sehr ähneln: Die Evolutionsstrategien (aus [Rechenberg, 1973]) und Genetische Algorithmen (aus [Holland, 1975]). Vorbild der evolutionären Algorithmen ist die biologische Evolution mit ihrer Stärke, Individuen an ein breites Spektrum an Umgebungsbedingungen optimal anpassen zu können. Sie haben das Ziel, die biologischen und genetischen Verfahren auf die Optimierung technischer Systeme zu übertragen. Da die Fortpflanzung und Evolution durch Rekombination, Mutation und verschiedene Umgebungsbedingungen einer Reihe an stochastischen Einflüssen unterliegen, handelt es sich bei evolutionären Algorithmen um stochastische Suchverfahren, die ihre Vorzüge gegenüber deterministischer Verfahren insb. bei nichtlinearen, diskontinuierlichen und multimodalen Zielfunktionen<sup>(2)</sup> sowie bei Problemen mit Variablen unterschiedlicher Repräsentationen (binär, ganzzahlig, reell) entfalten [Pohlheim, 2013].

Der grundlegende Ablauf eines evolutionären Algorithmus beginnt mit der Initialisierung, in der eine Anfangspopulation erstellt und anfänglich parametrisiert wird. Dazu können im einfachsten Fall zufällige Werte aus dem Definitionsbereich der zu optimierenden Variablen erstellt werden. Diese erste Generation wird dann bewertet, indem die Zielfunktion berechnet wird. Es folgt der *evolutionäre Kreislauf*, in dem neue Generationen iterativ erstellt und ausgewertet werden, bis vorher festgelegte Abbruchbedingungen (wie bspw. Abweichung der Zielfunktion, Anzahl der Generationen ohne signifikante Änderung oder Iterationsdauer) erreicht sind. In jeder Iteration wird neben der Population eine Auswahl an (oder alle) Individuen ausgewertet und diesen eine individuelle Fitness zugewiesen, was einen direkten Vergleich der Individuen untereinander für die anschließende *Selektion* ermöglicht. Zur Erstellung der Nachkommen (nächste Generation) werden die *fittesten* Individuen der aktuellen Generation als Eltern verwendet, deren *Erbgut* (Variablen) evolutionären Operatoren, einer Nachbildung der aus der Genetik bekannten Evolutionsfaktoren, unterliegen. Durch die *Rekombination* der Variablen der Eltern werden Nachkommen parametrisiert, die zudem einer Stochastik durch *Mutation* unterliegen. Es folgt die Berechnung der Zielfunktion und damit die Bewertung der neuen Generation und seiner Individuen sowie ihr Vergleich untereinander, um wiederum die fittesten Eltern der Folgegeneration zu ermitteln. Die Struktur dieses Ablaufs ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

Die Laufzeit und Güte von evolutionären Algorithmen wird maßgeblich von der konkreten und auf das vorliegende Problem angepassten Implementierung der Evolutionsfaktoren bestimmt, insb. der Rekombination, mit der die Operationen zur Zerlegung und Zusammenführung der Erbinformation (Variablen) der Eltern für die Nachkommen festgelegt werden. Erweiterungen der evolutionären Algorithmen beinhalten die Betrachtung und Implementierung zusätzlicher

<sup>(2)</sup>wie bspw. die Rastrigin-Funktion, die in [Torn und Zilinskas, 1989] beschrieben ist und sich durch eine hohe Anzahl lokaler Minima und Maxima kennzeichnet



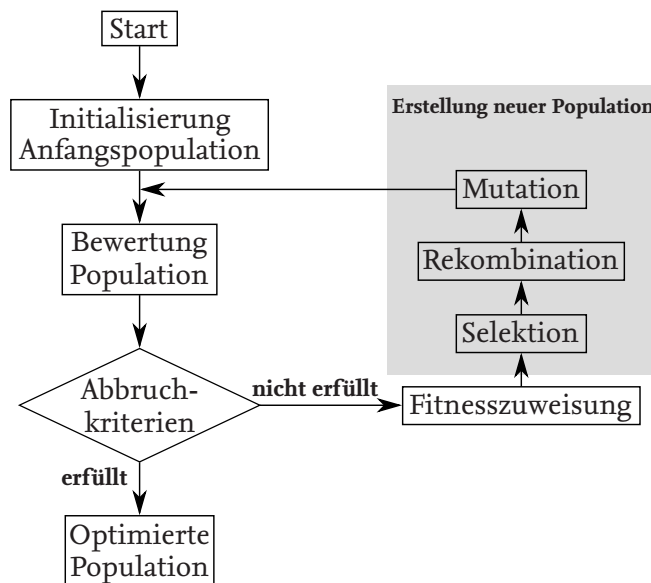


Abbildung 5.4.: Ablaufs eines evolutionären Algorithmus gemäß [Pohlheim, 2013]

Evolutionsfaktoren, wie bspw. das Ersetzen der Elternpopulation (Wiedereinfügen), die Migration oder die Konkurrenz von Individuen untereinander. Evolutionäre Algorithmen kombinieren die Vorteile einer lokalen Suche (vgl. Gradientenverfahren oder Greedy-Algorithmus) mit der Möglichkeit, lokale Optima über Sprünge zu verlassen. Sie sind daher für große Suchräume geeignet, selbst wenn deren genauen Eigenschaften unbekannt sind [Buttelmann und Lohmann, 2004]. Ein weiterer Vorteil evolutionärer Algorithmen ist ihre Parallelisierbarkeit bei der Auswertung der Zielfunktion einzelner Individuen einer Population. Anwendung finden evolutionäre Algorithmen bei der Optimierung Neuronaler Netze sowie in der Regelungstechnik bei der Auslegung von Fuzzy-Reglern [Schoen, 2005]. Aufgrund des ausgereiften Standes von deterministischen Algorithmen, kommen stochastische Suchverfahren bei Standortproblemen nur dann zur Anwendung, wenn z. B. (wie in [Maric, 2010]) eine nichtlineare Zielfunktion vorliegt.

### 5.1.3. Das Simplex-Verfahren

Beim Simplex-Verfahren handelt es sich um einen Algorithmus, der 1947 explizit zur Lösung von linearen Programmen entwickelt wurde und in [Dantzig, 1951] vorgestellt wird. Bei der Behandlung linearer Programme sind die folgenden allgemeingültigen Eigenschaften eines Problems festzustellen:

1. Dadurch, dass die Nebenbedingungen als lineare Un-/Gleichungen formuliert werden, muss das resultierende Polytop, mit dem der zulässige Lösungsbereich eingegrenzt wird, *konvex* sein [Cormen et al., 2009].
2. Das betrachtete Polytop grenzt einen Bereich eines *linearen* Skalarfeldes ab (vgl. beispielhafter (Farb-)Verlauf in Abbildung 5.1). Maxima und Minima innerhalb dieses Polytops liegen folglich an dessen Eckpunkten oder einer Seite bzw. Kante des Polytops, beinhalten aber in jedem Fall (mindestens) einen *Eckpunkt* [Cormen et al., 2009].



Unter Berücksichtigung dieser Eigenschaften lässt sich ein lineares Programm auf ein finites Problem reduzieren, da es hinreichend ist, die (endliche) Anzahl von Eckpunkten auszuwerten. In einer geometrischen Interpretation des Simplex-Algorithmus werden diese Eigenschaften genutzt, um nach Ermittlung des ersten zulässigen Eckpunktes sich iterativ über benachbarte Eckpunkte der Lösung zu nähern. Der Algorithmus bewegt sich entlang angrenzender Kanten jeweils zum nächsten Eckpunkt, sofern dieser keine Verschlechterung mit sich führt. Dieses Vorgehen kann in Form eines Greedy-Algorithmus implementiert werden. Nachdem ein Eckpunkt erreicht ist, dessen benachbarten Eckpunkte nur eine Verschlechterung der Zielfunktion mit sich führen, ist ein lokales Optimum erreicht. Weil es sich bei der betrachteten zulässigen Lösungsmenge um ein konvexes Polytop handelt, wird die ermittelte Lösung folglich immer das globale Optimum des Problems sein.

Für die Ausführung des Simplex-Algorithmus ist es erforderlich, das mit Ungleichungen definierte lineare Programm, in eine sog. *Slack-Form* zu überführen. Dabei werden die Nebenbedingungen aus Gleichung 5.2 statt als Ungleichungen als Gleichungen formuliert. Hierfür werden sog. *Slack-Variablen* eingeführt, mit denen das resultierende Gleichungssystem zwar unterbestimmt wird, mit denen jedoch das gleiche Polytop betrachtet wird. Das resultierende Gleichungssystem wird sukzessive mit dem Pivot-Verfahren gelöst, dessen Vorgehen Ähnlichkeiten mit der Gauss-Eliminierung aufweist. Für eine anschauliche Herleitung des Simplex-Algorithmus zur Lösung von linearen Programmen wird auf [Dahms, 2015] verwiesen. Eine vollständige Herleitung findet sich in [Cormen et al., 2009].

Weil der Simplex-Algorithmus in den meisten Fällen sehr schnell die optimale Lösung von Problemen findet, hat er sich bereits kurz nach seiner Veröffentlichung zum Standard-Lösungsverfahren für lineare Programme etabliert. In der Wissenschaft wird es dennoch als Nachteil betrachtet, dass die Lösung von Problemen mit dem Simplex-Algorithmus im ungünstigsten Fall nicht in polynomialer Dauer erfolgt. Selbst Dantzig hatte anfänglich große Zweifel ob sein Algorithmus effizient sein kann, wenn bei der Lösung eines Problems das betrachtete Polytop erst entlang seiner Hülle *umrundet* werden muss, statt es *direkt zu durchqueren* [Dantzig, 1990]. Der erste Algorithmus, der in polynomialer Dauer die Lösung eines linearen Programms ermitteln konnte, ist die in [Kachiyan, 1979] vorgestellte Ellipsoid-Methode, der jedoch aufgrund seiner hohen erforderlichen Berechnungsdauer nur selten praktikabel ist. Aufbauend auf der Vorarbeit [Karmarkar, 1984] gelang in den 1990ern der Durchbruch des *Innere-Punkte-Verfahrens* (auch *Barrier-Verfahren*), das mit dem Simplex-Algorithmus vergleichbar schnell ist und dazu in polynomialer Rechendauer die optimale Lösung eines linearen Programms ermittelt. Dieser Lösungsansatz wird in [Mehrotra, 1992] vorgestellt und näher erläutert.

## 5.2. Stand von Wissenschaft und Technik

Standortprobleme befassen sich mit der optimalen Platzierung von Kundendienstanlagen und sind ein Teilbereich des *Operations Research* [Zimmermann, 2005]. Zur Minimierung der Kosten sind dabei die Errichtungs- und Betriebskosten sowie die räumlich verteilte Kundennachfrage und die daraus entstehenden Einnahmen zu berücksichtigen. Standortprobleme werden in der Wissenschaft seit den 1960er Jahren untersucht und zur Berücksichtigung neuer Aspekte fortlaufend weiterentwickelt. Beispiele für relevante Vorarbeiten aus diesem Zeitraum sind [Balinski und Wolfe, 1963; Kuehn und Hamburger, 1963; Manne, 1964; Stollsteimer, 1963].

Wesentliches Resultat dieser Arbeiten ist die Formulierung des *p-median* Problems sowie zahlreicher Lösungsverfahren, die zur Optimierung von Standorten vielfach Anwendung fanden. Der Ansatz des *p-median* Modells verfolgt das Ziel, durch Platzierung von  $p$  Einrichtungen den geometrischen Median, d.h. die Summe der Abstände einer Einrichtung zu deren zugewiesenen Kunden, zu minimieren<sup>(3)</sup>. Es werden dabei alle Kunden mit den Diensten ihrer zugehörigen Einrichtung abgedeckt. Mit der Einführung eines maximalen Abstands, der zwischen Standorten von Kunden und den betrachteten Einrichtungen liegen darf, gliedern sich Standortprobleme in zwei häufig verwendete Klassen [Church und Meadows, 1979]: das Mengenüberdeckungs-Standortproblem und das Überdeckungs-Standortproblem. Das Mengenüberdeckungs-Standortproblem (engl.: *set covering location problem*) wird mit den Arbeiten [Hakimi, 1964] und [Toregas et al., 1971] eingeführt und verfolgt das Ziel, die Anzahl notwendiger Einrichtungen (Standorte) zu minimieren, dabei jedoch eine bestehende *Kundennachfrage vollständig abzudecken*. Das Überdeckungs-Standortproblem (engl.: *maximal covering location problem*) ist in [Church und ReVelle, 1974] formuliert und maximiert die mit Einrichtungen abgedeckte Kundenachfrage durch Platzierung einer *spezifizierten Anzahl von Einrichtungen*.

### 5.2.1. Das flow capturing location-allocation model nach Hodgson und Berman

Ein erstes Modell, das sich explizit mit der optimalen Platzierung von Elementen einer Versorgungsinfrastruktur in einem Verkehrssystem unter Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage befasst, ist in [Goodchild und Noronha, 1987] vorgestellt. Die Optimierung basiert auf einem *p-Median* Modell. Erste Erweiterungen dieses Modells, die die Anzahl der passierten Ladestellen minimieren, werden in [Hodgson, 1990] sowie in [Berman et al., 1992] vorgestellt und mit *flow capturing location-allocation model* (kurz: FCLM, übersetzt: Modell für die Standort-Zuteilung durch *Einfangen* von Verkehrsflüssen) sowie *optimal location of discretionary service facilities* (übersetzt: optimale Positionierung erforderlicher Kundendienstanlagen) betitelt. Die Motivation für deren Entwicklungen ist es, die Platzierung von Kundendienstanlagen in einem gegebenem Verkehrssystem zu optimieren. Als Beispiele hierfür werden Geldautomaten, Geschäfte, Tankstellen oder Werbeplakate genannt.

In beiden Modellen werden die betrachteten Verkehrssysteme mit einem Graph der Verkehrswegeinfrastruktur sowie den aggregierten Verkehrsflüssen entlang seiner Kanten beschrieben, wobei Verkehrsflüsse aus einer Quelle-Ziel-Matrix resultieren und über eine feste Dauer aggregiert werden. Beide Modelle sind nahezu identisch und wurden unabhängig von einander entwickelt [Berman et al., 1995]. Um das Modell vorzustellen, wird die in [Hodgson, 1990] eingeführte Notation mit den folgenden Variablen verwendet:

$q$	bezeichnet ein Quelle-Ziel-Paar aus
$Q$	der Menge aller Quelle-Ziel-Paare.
$f_q$	ist der Verkehrsfluss auf dem Pfad des Quelle-Ziel-Paars $q$ .
$y_q$	ist eine binäre Variable, mit

<sup>(3)</sup>Das *p-median* Problem gehört zur Klasse der *minisum*-Probleme. Eine weitere Klasse ist die der *minimax*-Probleme, zu denen auch das bei Standortoptimierungen häufig verwendete *p-center* Problem zählt, welches die  $p$  maximalen Abstände zwischen Kunden und ihren Einrichtungen (Mittelpunkte, engl.: *center*) minimiert.

$$y_q = \begin{cases} 1 & \text{wenn der Fluss } f_q \text{ von einer Kundendienstanlage bedient wird,} \\ 0 & \text{wenn nicht.} \end{cases}$$

$k$  bezeichnet eine potenzielle Kundendienstanlage aus

$\mathcal{K}$ , der Menge aller möglichen Kandidaten.

$x_k$  ist eine binäre Variable, mit

$$x_k = \begin{cases} 1 & \text{wenn am Kandidaten } k \text{ eine Kundendienstanlage platziert ist,} \\ 0 & \text{wenn nicht.} \end{cases}$$

$\mathcal{N}_q$  ist die Menge der Knoten, die vom Fluss  $q$  passiert werden.

$p$  ist die Anzahl der optimal zu platzierenden Kundendienstanlagen.

Das Ziel dieser Optimierung ist es die Anzahl der Flüsse zu maximieren, die entlang ihrer Wege von einer Kundendienstanlage bedient oder *eingefangen*<sup>(4)</sup> werden. Das Problem wird in beiden Arbeiten gemäß Gleichung 5.4 als binäres lineares Programm formuliert [Berman et al., 1992; Hodgson, 1990]:

$$\max Z = \sum_{q \in \mathcal{Q}} f_q y_q. \quad (5.4)$$

Diese Maximierung unterliegt den in Gleichungen 5.5 und 5.6 formulierten Nebenbedingungen. Mit Gleichung 5.5 wird festgelegt, dass der Fluss eines Quelle-Ziel-Paares  $q$  nur als *eingefangen* gilt und somit von den Kundendienstanlagen bedient wird, wenn mindestens eine Kundendienstanlage auf dessen Weg liegt. Mit Gleichung 5.6 wird die Anzahl der optimal zu platzierenden Anlagen auf  $p$  begrenzt:

$$\sum_{k \in \mathcal{N}_q} x_k \geq y_q \quad \forall \quad q \in \mathcal{Q}, \quad (5.5)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} x_k = p. \quad (5.6)$$

Weil dieses Problem NP-schwer ist, werden unter Berücksichtigung der damalig verfügbaren Rechenleistung in [Hodgson, 1990] und [Berman et al., 1992] jeweils heuristische Suchverfahren zur Lösung des FCLMs vorgeschlagen, um den Rechenaufwand für große Verkehrssysteme zu reduzieren und in endlicher Rechendauer ein hinreichend gutes Ergebnis zu ermitteln. In [Hodgson, 1990] wird in Anlehnung an [Zeller et al., 1980] eine Suchheuristik basierend auf dem Greedy-Algorithmus vorgestellt. Dieser platziert iterativ Kundendienstanlagen an Knoten, so dass in jedem Schritt der noch nicht erfasste Verkehrsfluss maximiert wird. Dies wird durchgeführt, bis  $\sum_{k \in \mathcal{K}} x_k = p$  Kundendienstanlagen platziert sind. Die Lösung dieser Suchheuristik wird mit dem globalen Optimum des binären linearen Programms verglichen und lieferte in vielen Fällen vergleichbare Ergebnisse [Berman et al., 1992; Hodgson, 1990].

Da jedoch mit einer auf dem Greedy-Algorithmus basierten Suchheuristik keine globale Optimalität gewährleistet werden kann, wird in [Berman et al., 1992] darüber hinaus ein Branch-and-Bound-Verfahren vorgestellt. Um eine vollständige Enumeration aller  $2^n$  möglichen

<sup>(4)</sup>Die Bezeichnung, dass ein Fluss *eingefangen* wird, resultiert aus Hodgsons Bezeichnung seines Modells: flow capturing location-allocation model. Ein Fluss zählt als *eingefangen*, wenn die darin enthaltenen Fahrzeuge mindestens eine Kundendienstanlage entlang ihrer Route passieren und sie somit von ihr bedient werden.

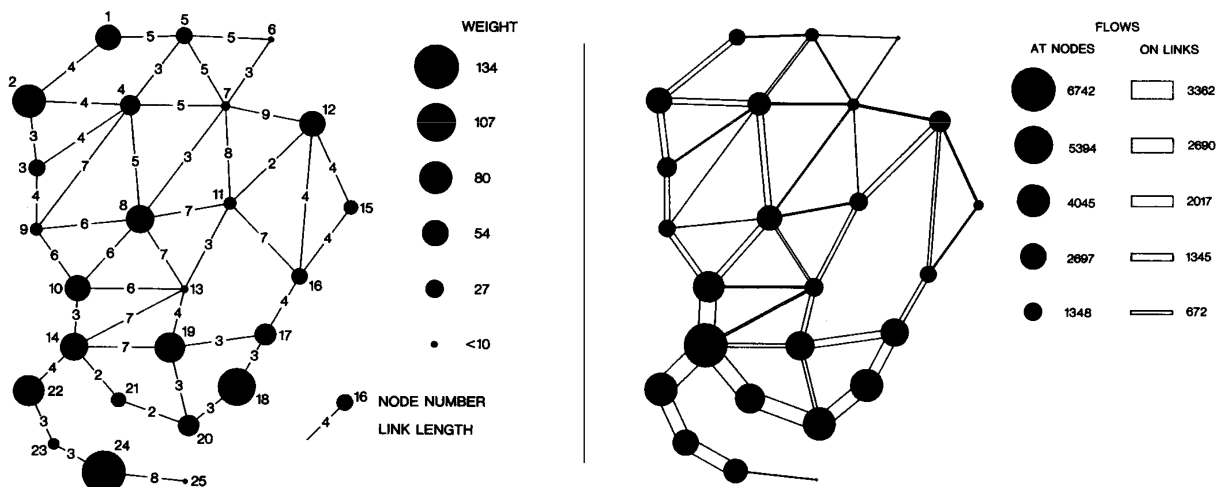


Abbildung 5.5.: Das in [Simchi-Levi und Berman, 1988] eingeführte und in [Hodgson, 1990] verwendete beispielhafte Straßennetz ist Grundlage und Betrachtungsgegenstand vieler auch späterer Studien, die sich mit der optimalen Platzierung von Kundendienstanlagen befassen, wie z. B. Ladestellen für Elektrofahrzeuge in [Kuby und Lim, 2005].

Kombinationen des binären linearen Programms zu reduzieren, werden Zweige entsprechend der in Abschnitt 5.1.2.2 vorgestellten Methodik ausgewertet. Mit der Auswertung der Zielfunktion an jedem Knoten kann durch die jeweilige binäre Entscheidung (Kundendienstanlage platzieren: 1, Kundendienstanlage nicht platzieren: 0) ein unterer Grenzwert der maximal auf den darunter liegenden Zweigen noch zu erfassenden Flüsse sowie ein oberer Grenzwert der gesamten noch nicht abgedeckten Flüsse festgelegt werden. Dies ermöglicht, dass die Exploration unplausibler oder ungünstiger Zweige an vielen Stellen vorzeitig abgebrochen werden kann.

Wesentlicher Vorteil des in [Hodgson, 1990] und [Berman et al., 1992] vorgestellten Problems ist, dass dieses als lineares Programm formuliert wird. Heutige Rechenleistungen und die Anwendung des Simplex-Verfahrens erlauben die Ermittlung globaler Optima in selbst vielfach größeren Verkehrssystemen. Bei der Aufstellung des Modells und der Formulierung des Optimierungsproblems werden jedoch folgende Annahmen über das betrachtete Verkehrssystem, dessen Infrastruktur sowie den darin befindlichen Verkehrsbetrieb getroffen:

- Verkehr wird in der gegebenen Infrastruktur makroskopisch in Form von aggregierten Flüssen betrachtet (vgl. Abbildung 5.5). Es werden weder die Verteilung von individuellen Fahrzeugen noch von ihren Haltepositionen berücksichtigt, die für eine Optimierung der Energieübertragungspunkte (auch entlang von Kanten und deren Fahrstreifensegmenten) und Integration der Übertragungsprozesse in den Verkehrsbetrieb bekannt sein müssten.
- Jeder Fahrer wählt den für ihn kürzesten Pfad durch das Verkehrsnetz. Quelle-Ziel-Paare haben die Eigenschaft, dass alle Fahrzeuge gleichen Ursprungs mit gleichem Ziel auch den gleichen Pfad durch das Netz nutzen. Im Kontext der Arbeit [Hodgson, 1990] sind somit Quelle-Ziel-Paare gleichbedeutend mit deren gewählten Routen. Diese Annahme vernachlässigt das in Kapitel 3 erläuterte Phänomen, dass Fahrzeuge (auch im realen Verkehr) iterativ ihre Routen optimieren, bis sich ein Nutzergleichgewicht eingestellt hat.

Darüber hinaus sind Quelle-Ziel-Paare in [Hodgson, 1990] symmetrisch. Die resultierenden Verkehrsflüsse teilen sich jeweils zur Hälfte in zwei mögliche Richtungen auf.

- Passiert ein Fahrzeug eine Kundendienstanlage, wird angenommen, dass der für den betrachteten Zweck (z. B. optische Erfassung einer Werbung oder Geschwindigkeitskontrolle) erforderliche Dienst für das Fahrzeug zugleich erbracht ist. Ein (der Kundendienstanlage) exponiertes Fahrzeug gilt als *eingefangen*. Es wird entweder angenommen, dass sowohl das Passieren einer einzigen Kundendienstanlage ausreichend ist als auch, dass bei der Betrachtung von Ladestellen, die Fahrzeuge an der zugehörigen Kundendienstanlage ohne Einschränkung des übrigen Verkehrs verweilen können, bis die erforderliche Dienstleistung erbracht wird. Was bei der Platzierung von Geldautomaten, Werbung oder Verkehrs-/Geschwindigkeitskontrollen optimale Ergebnisse liefert, erfordert bei der Betrachtung von Ladestellen zur Versorgung alternativ angetriebener Fahrzeuge die Berücksichtigung der folgenden Aspekte:

**Dauer der Energieübertragung:**

Die für den Betrieb eines Fahrzeugs erforderliche Energie ist unter Annahme einer konstanten Ladeleistung proportional zur erforderlichen Ladedauer. Im Gegensatz zu konventionellen mit Benzin oder Diesel betriebenen Fahrzeugen sind die Ladedauern bei Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten aufgrund der geringeren Ladeleistungen in jedem Fall zu berücksichtigen. Dementsprechend müssen Fahrzeuge eine nicht unerhebliche Dauer an einer (oder mehreren) Ladestelle(n) verbringen, an denen sie mit der erforderlichen Energie versorgt werden. Diese Dauer bleibt in [Berman et al., 1992; Hodgson, 1990] und in den meisten bisherigen Modellen unberücksichtigt. Die Energieübertragung selbst ist dabei nur als (Netto-)Teil eines Gesamtprozesses zur Energieversorgung zu betrachten. Es müssen ebenso die Dauern berücksichtigt werden, die nach einem ggf. erforderlichen Fahrzeughalt für die Authentifizierung von Fahrzeugen und die Autorisierung der Ladeprozesse sowie die Initialisierung der Energieübertragung erforderlich sind. Erst anschließend beginnt die eigentliche Energieübertragung.

**Individueller Energiebedarf von Fahrzeugen und erforderliche Anzahl von Ladestellen:**

Es wird in den eingeführten Modellen angenommen, dass für die Bereitstellung der erforderlichen Dienstleistung jedes Fahrzeug nur *eine einzige* Kundendienstanlage passieren muss. Bei der Betrachtung der Energieversorgung an Ladestellen und der betrieblichen Integration der Energieübertragung in übrige Verkehrsprozesse kann die Übertragung der erforderlichen Energiemenge auch räumlich verteilt an mehreren Ladestellen erfolgen. Die Anzahl notwendiger Zwischenladungen ergibt sich neben der Ladeleistung und der nutzbaren Ladedauer aus dem Energiebedarf eines Fahrzeugs. Das vorgestellte Modell von Hodgson und Berman et al. berücksichtigt keinen Mehrwert, der durch das Passieren weiterer Kundendienstanlagen erzielt werden könnte.

**Bildung von Warteschlangen:**

Möchte ein Fahrzeug eine Kundendienstanlage in Anspruch nehmen, die jedoch durch ein anderes Fahrzeug bereits belegt ist, entscheidet die Kapazität der Anlage, ob weitere Fahrzeuge bedient werden können. Es kann bei Überschreitung dieser Kapazität zur



Bildung von Warteschlangen kommen, die eine Behinderung des Verkehrs zur Folge hätte. Die Inanspruchnahme einer Kundendienstanlage und die daraus resultierenden Auswirkungen auf den übrigen Verkehr werden im Modell von Hodgson und Berman et al. nicht betrachtet. Darüber hinaus erlauben makroskopische Modelle keine Abbildung dieser Effekte im erforderlichen Detaillierungsgrad.

- Bei der Wahl der geeigneten Kandidaten für die Positionierung von Kundendienstanlagen wird die Annahme getroffen, dass ein Knoten den gesamten Fluss aller eingehenden (sowie ausgehenden) Kanten *eingängt*. Insofern wird in [Berman et al., 1992; Hodgson, 1990] argumentiert, dass sich insb. Knoten als Kandidaten für die Platzierung von Kundendienstanlagen eignen. Aus diesem Grund werden in den Arbeiten nur Knoten als Kandidaten untersucht, deren Eignung mit der durchdringenden Verkehrsmenge steigt. Werden Ladestellen und hierfür geeignete Kandidaten einer Verkehrsinfrastruktur betrachtet, in denen sich die Prozesse der Energieübertragung in den Verkehrsbetrieb (und dort überwiegend während Fahrzeughalten) eingliedern sollten, entfallen Knoten (=Kreuzungen) als geeignete Kandidaten. Zum einen ist es in den meisten Ländern verboten, auf Kreuzungen zu halten. Verglichen mit anderen Orten in der Verkehrswegeinfrastruktur ist die Aufenthaltsdauer von Fahrzeugen auf Kreuzungen daher sehr gering. Zum anderen erfordert die Energieübertragung eine präzise Positionierung von Fahrzeugen in der näheren Umgebung von Ladestellen. Mit makroskopisch aggregierten Daten werden Fahrzeugpositionen nicht in dem Detaillierungsgrad wiedergegeben, wie sie für die Positionierung von Ladestellen erforderlich sind.
- Das Ziel in der von Hodgson und Berman et al. eingeführten Optimierung ist es eine gegebene Anzahl von  $p$  Kundendienstanlagen optimal zu platzieren. Die Errichtungskosten der Anlagen werden dabei nicht berücksichtigt bzw. es wird angenommen, dass sie für jede Kundendienstanlage gleich sind. Diese Annahme ist insoweit vertretbar, als dass bei der Markteinführung einer neuen Technologie die Streuung der Errichtungskosten der *ersten* Anlage nur wenig von deren Position abhängen wird. Besonders bei der Betrachtung von Ladestellen für alternativ betriebene Fahrzeuge werden nach der Inbetriebnahme erster Anlagen die weiteren Errichtungskosten stark von deren Entfernung zu bereits existierenden Anlagen abhängen. Dabei sind Kosten mit Nutzen abzuwägen, denn benachbarte Anlagen sind ggf. günstiger in der Errichtung, erreichen jedoch potenziell weniger neue Kunden. Bei der Formulierung der Zielfunktion wäre die Festlegung eines festen Budgets, mit dem die Menge der ausreichend versorgten Fahrzeuge maximiert wird, oder eines Anteils der betrachteten Fahrzeugmenge, für deren ausreichende Versorgung die erforderlichen Errichtungskosten minimiert wird, zweckmäßiger.

Zur Überwindung dieser Defizite existieren viele Weitererweiterungen des ursprünglichen FCLMs aus [Berman et al., 1992; Hodgson, 1990]. Die bedeutendsten Beiträge für die Standortoptimierung von Komponenten einer Energieversorgungsinfrastruktur werden in den folgenden Abschnitten zusammengefasst und diskutiert.



### 5.2.2. Umwege für das Erreichen von Ladestellen

Eine erste Erweiterung des FCLMs, die sich für eine optimierte Anordnung einer Energieversorgungsinfrastruktur eignet, wird in [Berman et al., 1995] vorgestellt. In dieser werden die gewählten Routen der Fahrzeuge berücksichtigt und dahingehend optimiert, dass mit einem definierten maximalen Umweg das Anfahren von Kundendienstanlagen möglich wird, während die Platzierung der Kundendienstanlagen die Anzahl der versorgten Fahrzeuge (Marktgröße) maximiert.

### 5.2.3. Begrenzte Fahrzeugreichweiten

Um die begrenzte Reichweite von Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten zu betrachten und die Anordnung von Ladestellen dahingehend zu optimieren, wird in [Kuby und Lim, 2005] das *flow refueling location model* (kurz: FRLM, übersetzt: Standort-Modell für das Nachladen von Verkehrsflüssen) als Erweiterung des FCLM-Modells vorgestellt. Es wird eine Lösungsheuristik vorgeschlagen, die eine sog. Master-Liste  $\mathcal{H}$  einführt, die alle Ladestellen-Konfigurationen an den Knoten eines Straßennetzwerks beinhaltet. Anschließend werden zur ausreichenden Abdeckung der Verkehrsnachfrage mit Ladestellen die definierten Pfade  $q \in \mathcal{Q}$  nacheinander mit den Konfigurationen in der Master-Liste  $\mathcal{H}$  abgeglichen und ungeeignete Konfigurationen  $h$ , die den jeweils betrachteten Pfad nicht ausreichend versorgen (weil der Abstand zwischen zwei Ladestellen größer ist als die Reichweite des Fahrzeugs), aus dieser Liste entfernt. Pfade sind auch hier die kürzeste Verbindung zwischen zwei Quelle-Ziel-Paaren. Die verbleibenden Konfigurationen in der Master-Liste sind alle möglichen Lösungen, aus der die Konfiguration mit minimalen Kosten zu wählen ist.

Das entwickelte Modell hat starke Ähnlichkeit zu dem FCLM aus [Hodgson, 1990]. Zur Berücksichtigung der Master-Liste  $\mathcal{H}$  sowie der Fahrzeugreichweiten werden jedoch neue Variablen eingeführt:

$h$  bezeichnet eine Konfiguration von Ladestellen an Knoten aus der Master-Liste

$\mathcal{H}$ , die die Menge aller möglichen Ladestellenkonfigurationen beinhaltet.

$a_{hk}$  ist eine binäre Variable, mit

$$a_{hk} = \begin{cases} 1 & \text{wenn Ladestelle } k \text{ in Konfiguration } h \text{ enthalten ist,} \\ 0 & \text{wenn nicht.} \end{cases}$$

$b_{qh}$  ist eine binäre Variable, mit

$$b_{qh} = \begin{cases} 1 & \text{wenn Ladestellenkonfiguration } h \text{ den Fluss } q \text{ versorgen kann,} \\ 0 & \text{wenn nicht.} \end{cases}$$

$v_h$  ist eine binäre Variable, mit

$$v_h = \begin{cases} 1 & \text{wenn alle Ladestellen in } h \text{ geöffnet sind,} \\ 0 & \text{wenn nicht.} \end{cases}$$

Die Zielfunktion des FRLM ist identisch mit der des FCLM aus [Hodgson, 1990] (siehe Gleichung 5.4). Diese maximiert den Verkehrsfluss, der durch Platzierung von  $p$  Ladestellen mit ausreichender Energie versorgt wird. Die Nebenbedingungen werden in [Kuby und Lim, 2005] jedoch neu formuliert. Gleichung 5.7 ist vergleichbar mit der ersten Nebenbedingung des FCLM aus [Hodgson,

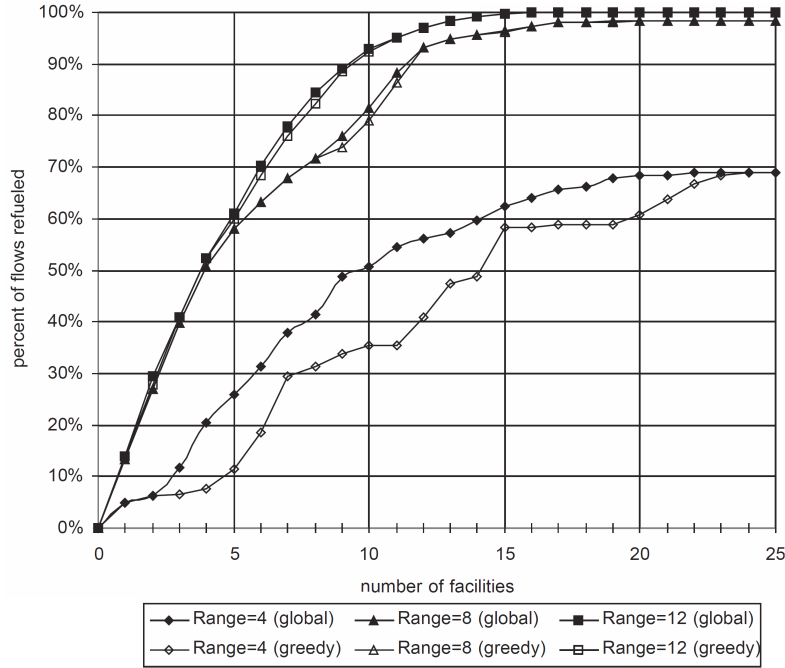


Abbildung 5.6.: Vergleich der in [Kuby und Lim, 2005] eingeführten Greedy-Suchheuristik mit der optimalen Lösung in Abhängigkeit der Anzahl zu platzierender Ladestellen (number of facilities) und unter Berücksichtigung verschiedener Fahrzeugreichweiten (range)

1990] (Gleichung 5.5). Der Unterschied ist, dass hier nicht *eine* Ladestelle  $i$ , sondern eine günstige Ladestellenkonfiguration  $h$  entlang des Pfades  $q$  geöffnet sein muss. Die Fahrzeuge entlang  $q$  müssen in kürzeren Abständen als deren Reichweiten mit Energie versorgt werden. Mit Gleichung 5.8 wird  $v_h$  null gesetzt, wenn nicht alle Ladestellen in  $h$  geöffnet sind. Mit Gleichung 5.9 wird die Anzahl der zu platzierenden Ladestellen  $p$  festgelegt. Mit Gleichung 5.10 werden die  $x_k$ ,  $v_h$  und  $y_q$  als binäre Variablen deklariert:

$$\sum_{h \in \mathcal{H}_q} b_{qh} v_h \geq y_q \quad \forall \quad q \in \mathcal{Q}, \quad (5.7)$$

$$a_{hk} x_k \geq v_h \quad \forall \quad h \in \mathcal{H}; k | a_{hk} = 1, \quad (5.8)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} x_k = p, \quad \text{und} \quad (5.9)$$

$$x_k, v_h, y_q \in \{0, 1\} \quad \forall \quad k, h, q. \quad (5.10)$$

Die auf einem Greedy-Algorithmus basierende Suchheuristik wird schließlich mit der optimalen Lösung des linearen Programms unter Nutzung der Verkehrswegeinfrastruktur und -nachfrage aus [Simchi-Levi und Berman, 1988] (siehe Abbildung 5.5) verglichen. Unter Betrachtung verschiedener Fahrzeugreichweiten wird in Abbildung 5.6 der Verlauf des Prozentsatzes versorgter Verkehrsflüsse in Abhängigkeit der Anzahl platzierter Ladestellen  $p$  gezeigt.

#### 5.2.4. Zusätzliche Ladepunkte entlang von Kanten

Ein Defizit des Modells in [Kuby und Lim, 2005] bleibt weiterhin die eingeschränkte Suche nach optimalen Ladestellenpositionen, die nur Knoten (Kreuzungen) in einem Verkehrssystem

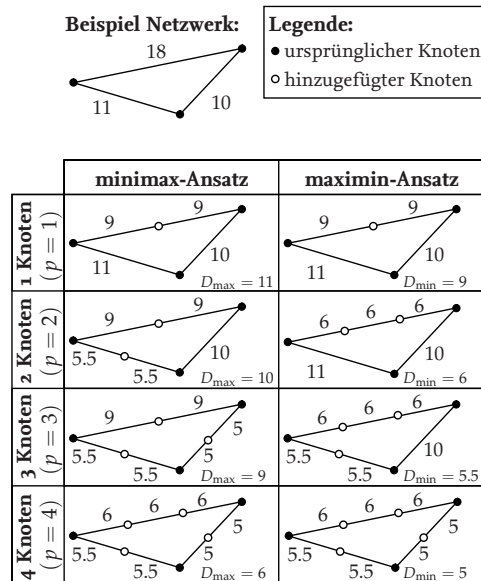


Abbildung 5.7.: Vergleich der in [Kuby et al., 2005] eingeführten maximin- und minimax-Ansätze zur optimalen und kontinuierlichen Anordnung neu zu platzierender Knoten mit Ladestellen in einem Netzwerk

berücksichtigt. Eine Erweiterung der Suche auf Kandidaten zwischen zwei Knoten wird in [Kuby et al., 2005] mit Vorstellung des *added-node dispersion problems* (kurz: ANDP, übersetzt: Verteilungsproblem zusätzlicher Knoten) vorgeschlagen, die eine kontinuierliche Betrachtung eines räumlich diskret definierten Graphen erlaubt. Die Autoren stellen zwei auf minimax- und maximin-Ansätze basierende Modellformulierungen vor und vergleichen diese miteinander sowie mit bestehenden Ansätzen. Der maximin-Ansatz ist bestrebt, die minimalen Längen der durch die neuen eingeführten Knoten entstandenen Unterkanten zu maximieren, um Ladestellen möglichst weit voneinander entfernt anzuordnen. Es soll die Redundanz von Knoten und somit die Wahrscheinlichkeit reduziert werden, dass die gleichen Fahrzeuge von Ladestellen mehrfach *übersorgt* werden. Der minimax-Ansatz hingegen verfolgt die Minimierung der maximalen Unterkantenlängen, die keine Ladestellen aufweisen. Das Ziel besteht also darin, eine hohe Verfügbarkeit von Ladestellen entlang möglicher Fahrzeugrouten zu gewährleisten. Ein Vergleich der beiden Ansätze in Abhängigkeit der Anzahl  $p$  neu zu platzierender Knoten ist in Abbildung 5.7 dargestellt. In [Kuby und Lim, 2005] wird die Verkehrsnachfrage im Verkehrssystem, wie bereits in [Hodgson, 1990] und [Berman et al., 1992], makroskopisch betrachtet. Auch hier erfolgt keine detaillierte Berücksichtigung von Betriebsprozessen einzelner Fahrzeuge, wie sie durch Auswertung von Fahrzeugtrajektorien möglich wäre. In [Kuby et al., 2005] bleibt die Verkehrsnachfrage gänzlich unberücksichtigt. Zudem wird nach wie vor angenommen, dass Fahrzeuge beim Erreichen einer Ladestelle ihre Route ohne weitere Einschränkungen unterbrechen können/müssen.

### 5.2.5. Begrenzte Kundenkapazität von Ladestellen

Zur Berücksichtigung der limitierten Kapazität von Ladestellen wird in [Upchurch et al., 2009] das *capacitated flow refueling location model* (kurz: CFRLM, übersetzt: kapazitives Standort-Modell

für das Nachladen von Verkehrsflüssen) vorgestellt und als MILP formuliert, welches das FRLM [Kuby und Lim, 2005] mit den klassischen Ansätzen des kapazitiven (oder auch beschränkten) Standortproblems kombiniert, die in [Barceló und Casanovas, 1984; Klose, 2013; Korte und Vygen, 2012] näher beschrieben sind. Dazu wird für jede Ladestelle eine Kapazität eingeführt, die als kumulierte Menge von Fahrzeugen definiert wird, die in einem Betrachtungszeitraum bedient werden kann. Zudem können im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Modellen jedem Knoten im Netz mehrere Ladestellen zugewiesen werden. Trotz Begrenzung der übertragbaren Energie pro Ladestelle fehlt bei diesem Ansatz die Berücksichtigung der temporalen Verteilung der Nutzungen bzw. Kundennachfragen und dadurch auch die Möglichkeit der Analyse, wie und ob sich die Ladeprozesse in den Verkehrsbetrieb eingliedern lassen. Dies liegt u. a. daran, dass den Verkehrsnachfragen keine Daten oder Modelle zum Energiebedarf von Fahrzeugen zugrunde liegen. Es kann somit kein Rückschluss auf die erforderlichen Ladedauern getroffen werden.

### 5.2.6. Weitere Ansätze für die Standortoptimierung von Ladestellen

Erste Veröffentlichungen, die seit etwa 2010 bei gleicher Zielsetzung zudem die Verkehrsnachfrage aus betrieblicher Sicht berücksichtigen, sind vermutlich auf die gestiegene Leistungsfähigkeit von Rechnern in Kombination mit der Markteinführung von Elektrofahrzeugen zurückzuführen [Frade et al., 2011a,b; Hajimiragha et al., 2011; Kunith et al., 2014; Kurczveil und Schnieder, 2014; Liu et al., 2013]. Motiviert durch die fehlende Infrastruktur ist der hauptsächliche Anwendungsbereich die optimierte Auslegung einer Energieversorgungsinfrastruktur für ausgewählte Fahrzeugflotten, wie bspw. des ÖPNVs.

Für den privaten Sektor des motorisierten Individualverkehrs wird in [Frade et al., 2011a] der Ansatz gewählt, dass Fahrzeuge in der näheren Umgebung von Wohnorten bzw. ihres nächtlichen Stellplatzes versorgt werden. Vorteil dieser Annahme ist, dass für die Einwohnerverteilung oft umfangreiche Datensätze verfügbar sind. Besonders in dicht besiedelten städtischen Bereichen kann jedoch Fahrzeugen nur selten ein fester Stellplatz zugewiesen und somit die Energieversorgung dieser Fahrzeuge während ihrer Abstelldauer gewährleistet werden. In [Worley et al., 2012] wird daher ein umfangreiches MILP vorgestellt, das auf Grundlage einer bekannten Verkehrsnachfrage die Betriebs- und Errichtungskosten einer Energieversorgungsinfrastruktur sowie die Routen und Betriebskosten der betrachteten Flotte unter Berücksichtigung ggf. erforderlicher Umwege optimiert. Erste Anwendung fand das Modell in der Betriebs- und Ladestellenoptimierung für einen Kurier-, Express- und Paketdienstleister unter Berücksichtigung realer aber stark eingeschränkter Felddaten. Aufgrund des umfangreichen Modells weisen die Autoren darauf hin, dass es sich zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nur für kleine Untersuchungsräume eignet. Darüber hinaus wird keine Aussage getroffen, ob und wie sich die Optimierung der Ladestellenstandorte auf Grundlage der betrachteten Betriebsdaten auf andere Flotten auswirkt, insb. unter welchen Gegebenheiten eine symbiotische Mischnutzung realisiert werden könnte. Durch Vernachlässigung der Ladedauern und Kapazität von Ladestellen bleibt bei diesem Ansatz ungeklärt, ob sich durch den in Kauf genommenen Umweg zur nächsten Ladestelle an dieser eine Warteschlange bildet und ob Fahrzeuge dort auf eine Ladung warten müssen. Verkehrsumlegungen, die aufgrund getätigter Umwege zu einer geänderten Verkehrsnachfrage führen, bleiben ebenfalls unberücksichtigt.

Im Kontext der induktiven Energieübertragung stellen die Arbeiten [Berthold et al., 2015; Kunith

Tabelle 5.1.: Überblick der Vorarbeiten zu Standortoptimierung von Ladestellen und ihrer Eigenschaften

Bezeichnung	Literatur	Mikroskopische Betrachtung der Verkehrsnachfrage	Berücksichtigung des Energiebedarfs oder der Reichweite individ. Fahrzeuge	Kontinuierlicher Lösungsraum im betrachteten Verkehrsnetz	Betriebl. Eignung pot. Kandidaten	Berücksichtig. der Dauer von Energieübertragungen	Berücksichtigung v. Warteschlangenbildung an Ladestellen	Berücksichtigung eines Kostenmodells
Flow-Capturing Location-Allocation Model (FCLM)	[Hodgson, 1990]	-	-	-	-	-	-	-
Optimal Location of Discretionary Service Facilities	[Berman et al., 1995], [Berman et al., 1992]	-	-	-	-	-	-	-
Flow Refueling Location Model (FRLM)	[Kuby und Lim, 2005]	-	✓	-	-	-	-	-
Added-Node Dispersion Problem (ANDP)	[Kuby und Lim, 2006] [Kuby et al., 2005]	-	-	✓	✓ * neuer Knoten	-	-	-
Capacitated Flow Refueling Location Model (CFRLM)	[Upchurch et al., 2009]	-	✓	-	-	-	✓	-
Simultaneous vehicle routing and charging station siting	[Worley et al., 2012]	✓	✓	✓	✓	✓	-	-
Stoch. Analyse v. ÖPNV-Umlaufdaten und Optimierung basierend auf Haltestellenaufenthaltsdauern	[Kurzveil und Schnieder, 2014]	✓ * nur an Bushaltestellen	✓	-	✓	✓	✓	-
Gemischt ganzzahliges lin. Prog. basierend auf ÖPNV-Haltestauern	[Berthold et al., 2015], [Kunith et al., 2014]	✓ * nur an Bushaltestellen	✓	-	✓	✓	✓	✓

et al., 2014; Kurzveil und Schnieder, 2014] Ansätze für die kombinatorische Optimierung der Energieversorgungsinfrastruktur im ÖPNV vor. Dabei werden besonders die temporalen Aspekte der erforderlichen Energieübertragungsprozesse berücksichtigt und in [Berthold et al., 2015; Kunith et al., 2014] ein umfassendes Kostenmodell für die Errichtung der Ladestelleninfrastruktur sowie Anschaffung von kompatiblen ÖPNV-Fahrzeugen berücksichtigt. Die Suche nach geeigneten Kandidaten der Ladestellen ist auf einen Lösungsraum eingegrenzt, der aus Haltestellen, Wendepunkten und Betriebshöfen besteht. Ladeprozesse lassen sich unter Berücksichtigung des öffentlichen Verkehrsbetriebs sehr gut in die dortigen Fahrzeughalte integrieren. Auch in diesen Arbeiten fehlt jedoch die Analyse einer möglichen Mischnutzung mit anderen Fahrzeugflotten. In Braunschweig werden Serien-Elektrofahrzeuge im öffentlich geförderten Projekt *InduktivLaden* umgerüstet, um sie für die induktive Ladung an Ladestellen des ÖPNV zu ertüchtigen [Dietrich et al., 2016]. Die Anordnung der Ladestellen an Haltestellen erschwert jedoch sowohl rechtlich als auch betrieblich den Zugang und deren extensive Nutzung durch Fahrzeuge des Individualverkehrs. Zudem stoßen die Freigabe der Infrastruktur des ÖPNV für Elektrofahrzeuge und ähnliche Maßnahmen, die mit einer Behinderung des ÖPNV-Betriebs einhergehen können, im Kreise der öffentlichen Verkehrsbetreiber auf scharfe Kritik [Deutsch et al., 2015].

Es zeigt sich, dass mit den Ansätzen bisheriger Arbeiten zwar isolierte Aspekte der optimierten Ladestellenanordnung berücksichtigt werden können. Was bislang jedoch fehlt, ist ein integriertes Modell, das die reale Verkehrsnachfrage über aggregierte makroskopische Verkehrsdaten hinaus berücksichtigt und die Auswertung des Verkehrsbetriebs in räumlich und zeitlich hinreichender Auflösung ermöglicht. Dies erfordert die Auswertung von Fahrzeugtrajektorien aus deren

Realbetrieb (sog. *floating car data*) oder aus mikroskopischen Verkehrssimulationen. Komplementär dazu muss bei der Allokation der Ladepunkte das Versorgungsnetz mit einer räumlichen Auflösung berücksichtigt werden, um geeignete Standorte für Ladepunkte zu ermitteln. In Tabelle 5.1 wird ein zusammenfassender Überblick zu den Vorarbeiten und den darin gewählten Ansätzen sowie wichtiger Charakteristiken gegeben.

### 5.3. Modell für die optimierte Positionierung von Ladestellen

Aufbauend auf den Vorarbeiten wird in diesem Abschnitt ein Ansatz vorgestellt und ein lineares Programm formuliert, das die Standortoptimierung einer Energieversorgungsinfrastruktur ermöglicht. Ziel ist es, die erforderlichen Komponenten der Energieversorgungsinfrastruktur für den vorherrschenden Verkehr optimal auszulegen, so dass Fahrzeuge keine Umwege für eine erforderliche Energieübertragung tätigen müssen. Ladeprozesse sollen sich dabei ohne zusätzliche Behinderung des übrigen Verkehrs in den Betrieb der Fahrzeuge eingliedern.

#### 5.3.1. Anforderungen an das Modell

Um die wesentlichen Defizite bisheriger Ansätze zu adressieren, müssen folgende Anforderungen an eine Weiterentwicklung gestellt werden:

##### **Verkehrsnachfrage:**

Um geeignete Ladestellenpositionen zu identifizieren, sind deutlich feiner aufgelöste Nachfragedaten in sowohl zeitlicher als auch räumlicher Hinsicht erforderlich. Eine Möglichkeit hierfür bieten kalibrierte und validierte mikroskopische Verkehrsszenarien. Nur dadurch kann eine Energieversorgungsinfrastruktur für den vorherrschenden Verkehr dimensioniert und optimiert werden. Darüber hinaus bietet die Analyse der resultierenden Fahrzeugrouten und -trajektorien die Möglichkeit, die Mischnutzung der ermittelten Ladestellen durch Fahrzeuge des ÖPNVs sowie des motorisierten Individualverkehrs zu untersuchen.

##### **Energiebedarf von Fahrzeugen:**

Ziel einer Energieversorgungsinfrastruktur ist, dass Fahrzeugen soviel Energie zugeführt wird, wie für ihren Betrieb in einem Untersuchungsraum erforderlich ist. Die erforderliche Energiemenge wird dabei von dem individuellen Energiebedarf jedes Fahrzeugs bestimmt, der sich wiederum aus der Auswertung von Trajektorien und einem parametrisierten Energiemodell ergibt.

##### **Kandidaten der Energieversorgungsinfrastruktur:**

Die Position potenzieller Ladestellen müssen aus einem Infrastrukturmodell abzuleiten sein. Sie müssen so gewählt und im Modell abgebildet werden, dass diese für Fahrzeuge während ihres Betriebs erreichbar sind und sich Fahrzeuge dort für eine ausreichende Dauer zum Laden aufhalten können. Dies schließt explizite Ladeaufenthalte auf Parkplätzen oder an sonstigen Ladeeinrichtungen sowie auf Kreuzungsbereichen als Kandidaten aus.

##### **Prozessmodell der Energieübertragung:**

Die Haltedauer der betrachteten Fahrzeuge an den Kandidaten ist mithilfe eines Prozessmodells zu berücksichtigen. Die Dauer, die für eine Energieübertragung genutzt



werden kann, ergibt sich nach Abzug einer Authentifizierungs-, Autorisierungs-, sowie Initialisierungsdauer.

#### **Kostenmodell für die Ladestelleneinrichtung:**

Darüber hinaus müssen in einem Modell die Kosten zur Einrichtung von Komponenten der Energieversorgungsinfrastruktur an den jeweiligen Infrastrukturkandidaten individuell berücksichtigt werden.

Die gemischt-ganzzahlige (bzw. binäre) lineare Programmierung erscheint in diesem Aspekt als geeignetes Mittel zur Formulierung der Optimierungsaufgabe, da es für Kandidaten jeweils nur zwei Möglichkeiten gibt: entweder wird eine Ladestelle am betrachteten Standort platziert oder nicht. Dies spiegelt sich in den Vorarbeiten wider, in denen Standortprobleme für eine Ladestellenallokation überwiegend mit linearen Programmen formuliert werden.

### **5.3.2. Formulierung eines linearen Programms zur Ladestellenpositionierung**

Für die optimierte Positionierung von Ladestellen wird im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich der Mobilitätsbedarf von motorisierten Straßenkraftfahrzeugen betrachtet. Zur Erzeugung der Verkehrsnachfrage kommen mikroskopische Verkehrsflusssimulationen mit SUMO zum Einsatz. Die Grundlagen dazu finden sich in Kapitel 2. Fahrzeugrouten werden durch Ermittlung des dynamischen Nutzergleichgewichts unter Berücksichtigung realer Verkehrsstärken kalibriert, deren Grundlagen in Kapitel 3 beschrieben sind. Die Berechnung des Energiebedarfs simulierter Fahrzeuginstanzen erfolgt mit dem in Kapitel 4 vorgestellten Energiemodell. Aufbauend darauf wird in diesem Abschnitt ein Modell in Form eines linearen Programms formuliert, welches die Optimierung der Anordnung einer Energieversorgungsinfrastruktur ermöglicht.

Es wird davon ausgegangen, dass Fahrzeugobjektdefinitionen  $\underline{v} \in \mathcal{V}$  bekannt sind, die sowohl Fahrzeugparameter als auch Routendefinitionen beinhalten. Die mikroskopische Simulation des Verkehrs- und Fahrzeugverhaltens erfordert darüber hinaus die Definition einer Verkehrsinfrastruktur. Aus der daraus folgenden Simulation resultieren Fahrzeugtrajektorien  $\underline{r} \in \mathcal{R}$ . Die Trajektorie eines Fahrzeugs  $v_i$  wird mit  $r_{v_i}$  bezeichnet und beinhaltet die zeitliche Abfolge von Fahrzeugpositionen. Die Simulationsergebnisse sowie Infrastruktur- und Fahrzeugdefinitionen müssen für eine anschließende Optimierung weiter ausgewertet werden. Dies erfordert Modelle über

- den Energiebedarf von Fahrzeugen,
- die Infrastruktur,
- die Errichtungskosten einzelner Komponenten der Energieversorgungsinfrastruktur und
- den Prozess der Energieübertragung.

Diese vier Punkte werden in den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben. Das konzipierte Verfahren und der darin enthaltene Ablauf, um für die Optimierung von Ladestellenstandorten ein gemischt ganzzahliges lineares Programm zu formulieren, ist in Abbildung 5.8 in Form eines Petrinetzes zusammengefasst.

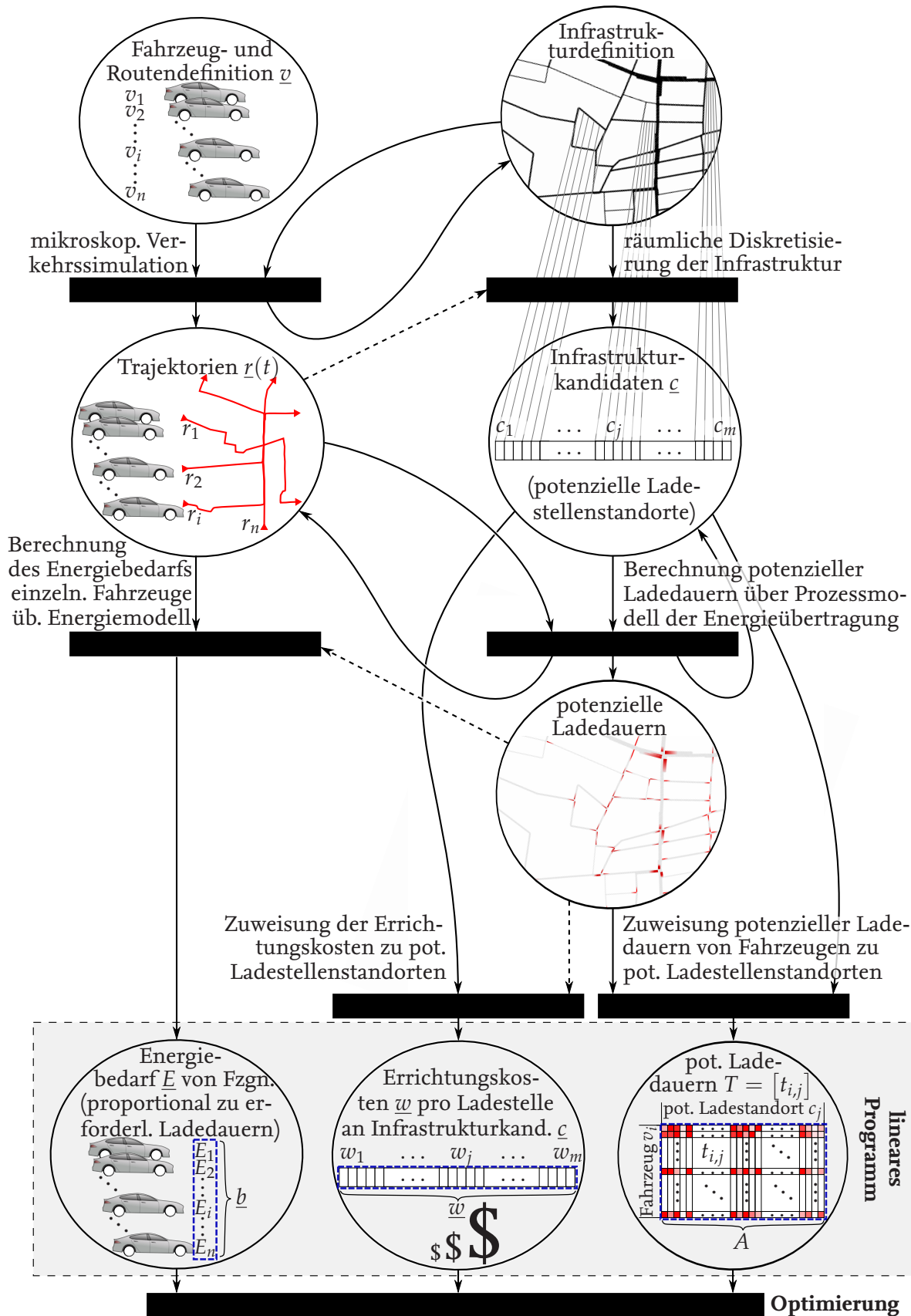


Abbildung 5.8.: Konzept für die Erstellung eines linearen Programms zur Standortoptimierung einer Energieversorgungsinfrastruktur

### 5.3.2.1. Energiebedarf von Fahrzeugen

Die Berechnung des Fahrzeugenergiebedarfs erfolgt durch Anwendung des in Kapitel 4 beschriebenen und entsprechend parametrisierten Fahrzeugmodells. Um für die vorgesehene Optimierung definierte Fahrzeugobjekte mit ihrem jeweiligen Energiebedarf zu attribuieren, wird die Variable  $\underline{E} \in \mathcal{E}$  eingeführt. Dabei entspricht  $E_{v_i}$  dem Energiebedarf des Fahrzeugs  $v_i$ . Ziel einer Optimierung ist, die Energiemenge den Fahrzeugen gemäß des Optimierungsziels und unter Berücksichtigung vorherrschender Nebenbedingungen wieder zuzuführen. Für die Dauer der Energiezufuhr wird angenommen, dass diese proportional zur zugeführten Energiemenge ist. Die Ladeleistung ist folglich konstant. Eine erforderliche Energiemenge  $E_{\text{laden}}$  kann unter Kenntnis der Ladeleistung  $P_{\text{laden}}$  äquivalent als erforderliche Ladedauer  $t_{\text{laden}}$  formuliert werden ( $E_{\text{laden}} = P_{\text{laden}} \cdot t_{\text{laden}}$ ).

### 5.3.2.2. Infrastruktur- und Kostenmodell

Die Verkehrswegeinfrastruktur für mikroskopische Verkehrssimulationen wird überwiegend mit gerichteten Graphen modelliert, deren Grundlagen sich in Kapitel 2 finden. Fahrstreifen werden als Kanten oder Kantenfolge und Kreuzungen als Knoten modelliert. Mikroskopische Verkehrsmodelle zeichnen sich dadurch aus, dass die instanziierten Fahrzeugobjekte zeitdiskret und räumlich kontinuierlich simuliert werden.

Um geeignete Kandidaten für die potenzielle Verortung von Ladestellen zu identifizieren, wird die betrachtete Infrastruktur räumlich diskretisiert. Jeder Fahrstreifen wird dabei in äquidistante Segmente der Länge  $\Delta s$  unterteilt. Die Unterteilung beginnt bei einem Knoten und setzt sich entgegengesetzt der Fahrtrichtung in Abständen von  $\Delta s$  zum nächsten Knoten fort, wobei sich die Länge des letzten Segments jedes Fahrstreifens (in dem Fahrzeugaufenthalte am unwahrscheinlichsten sind) aus dem Rest der Division  $l_{\text{Kante}}/\Delta s$  errechnet. Aus einem Infrastrukturmodell ergeben sich daher Kandidaten  $\underline{c} \in \mathcal{C}$ , die jeweils einem dieser Segmente entsprechen. Diese stellen die Kandidaten der Infrastruktur und somit potenzielle Ladestellenstandorte dar. Dieses Vorgehen ist beispielhaft in Abbildung 5.9 dargestellt.

Entscheidend für eine Optimierung von Standorten ist zudem die Berücksichtigung der Errichtungskosten von Ladestellen an den jeweiligen Kandidaten. Dazu werden die Kosten  $\underline{w} \in \mathcal{W}$  eingeführt. Mit der Wahl von  $w_j$  können die Errichtungskosten einer Ladestelle am potenziellen Ladestellenstandort  $c_j$  festgelegt werden. Die Kosten sind von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, wie z.B. dem Abstand zur nächsten Netzanschlussstelle oder der baulichen Beschaffenheit und Zugänglichkeit am jeweiligen Standort.

Es wird zudem der zu optimierende binäre Entscheidungsvektor

$$\underline{x} = [x_{c_j}] \quad \text{mit } c_j = 1, \dots, m \text{ und } x_{c_j} \in \{0, 1\} \quad (5.11)$$

eingeführt. Dessen Elemente  $x_{c_j}$  geben an, ob am Standort  $c_j$  eine Ladestelle existiert ( $x_{c_j} = 1$ ) oder nicht ( $x_{c_j} = 0$ ). Diese Elemente beinhalten nach Abschluss der Optimierung das Ergebnis.

### 5.3.2.3. Prozessmodell der Energieübertragung – Berücksichtigung der Ladeprozesse im Verkehrsbetrieb

Komplementär zu den Errichtungskosten ergibt sich der Nutzen einer Ladestelle aus der Energiemenge, die sie während eines betrachteten Intervalls in Fahrzeuge überträgt. Nach

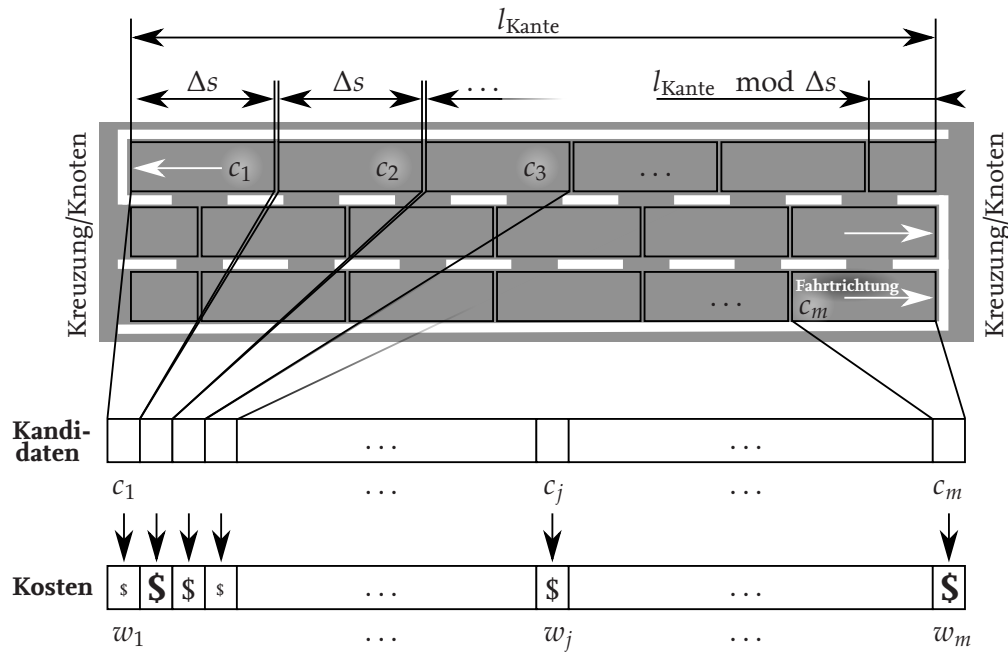


Abbildung 5.9.: Räumliche Diskretisierung der Verkehrsweginfrastruktur: Darstellung einer Kante zwischen zwei Knoten mit drei Fahrstreifen und dessen räumlicher Diskretisierung sowie Zuordnung der Errichtungskosten von Ladestellen an den jeweiligen Kandidaten

Festlegung der Ladestellenkandidaten aus der Infrastrukturdefinition, muss die mögliche Energiemenge ermittelt werden, die an den identifizierten Standorten in Fahrzeuge übertragen werden kann.

Dies erfolgt durch Einführung eines Prozessmodells für die Energieübertragung, dessen Anforderungen in Abschnitt 2.4.1.6 vorgestellt wurden. Eine Implementierung dieses Prozessmodells findet sich im Verkehrssimulationswerkzeug SUMO, welches seit Version 0.24.0 die Definition von Ladestellen-Objekten unterstützt. Bei der Auswertung von Fahrzeugtrajektorien kommt *jeder* diskrete Infrastruktur-Kandidat  $c_j$  als potenzielle Ladestellenposition in Frage. Bei der Betrachtung eines Übertragungssystems bzw. einer -technologie müssen für die Optimierung einer Versorgungsinfrastruktur die folgenden betrieblichen Kriterien berücksichtigt werden.

**Fahrzeugstillstand:** Je nach betrachtetem System muss für eine Energieübertragung differenziert werden, ob Fahrzeuge sich währenddessen bewegen dürfen (vgl. Energieübertragung mittels Oberleitungen oder *dynamisches Laden* bei induktiver Energieübertragung) oder ein Fahrzeugstillstand  $v_{\text{Fzg}}(t) = 0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  erforderlich ist (vgl. *stationäres Laden* an Steckdose oder Tankstelle).

**Anmeldedauer:** Darüber hinaus ist eine Dauer zur Anmeldung der fahrzeugseitigen Ladeeinrichtung an der infrastrukturseitigen Ladestelle zu berücksichtigen, bevor die eigentliche Energieübertragung beginnen kann, nachdem alle betrieblichen Voraussetzungen für die Energieübertragung erfüllt sind. Diese Dauer beinhaltet den Aufbau der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestelle, die fahrzeugseitige Ladungsanforderung, die Fahrzeugauthentifizierung und -autorisierung, Ladungsinitialisierung sowie ggf.

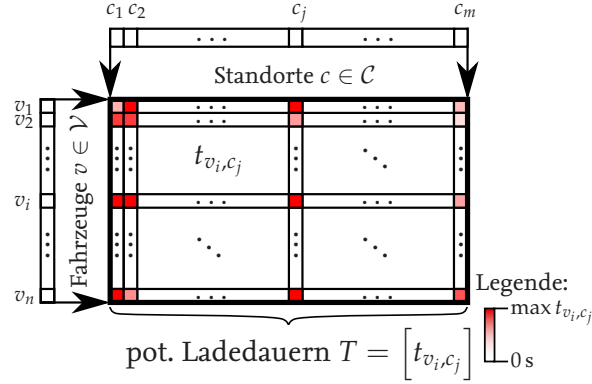


Abbildung 5.10.: Struktur der Matrix  $T = [t_{v_i, c_j}]$ , die zur Verortung potenzieller Ladedauern von Fahrzeugen  $\mathcal{V}$  an Infrastrukturkandidaten  $\mathcal{C}$  dient

erforderliche Synchronisationsprozesse.

**Ladeleistung:** Bei der Energieübertragung ist die Ladeleistung  $P_{\text{laden}}$  des betrachteten Systems von zentraler Bedeutung.

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien werden Fahrzeugtrajektorien ausgewertet, um die potenziellen Ladedauern an den identifizierten Infrastrukturkandidaten zu ermitteln, die für die reine Energieübertragung genutzt werden können und die wiederum proportional zur übertragbaren Energiemenge sind. Die Trajektorie jedes Fahrzeugs wird in dieser Weise ausgewertet, so dass eine Matrix  $T = [t_{v_i, c_j}]$  entsteht, deren Elemente  $t_{v_i, c_j}$  jeweils die potenzielle Ladedauer eines Fahrzeugs  $v_i$  am Infrastrukturkandidat  $c_j$  repräsentieren. Die Struktur dieser Matrix ist in Abbildung 5.10 dargestellt.

#### 5.3.2.4. Einführung eines gemischt-ganzzahligen linearen Programms

Ziel einer Optimierung ist es, die Errichtungskosten einer Ladestelleninfrastruktur zu minimieren und gleichzeitig den Energiebedarf von Fahrzeugen durch eine ausreichende Energiezufuhr zu kompensieren. Die Zielfunktion ist in Gleichung 5.12 formuliert:

$$\min \underline{w}^\top \underline{x}, \quad \text{mit } x_c \in \{0, 1\}. \quad (5.12)$$

Diese Zielfunktion erfordert die Einführung zusätzlicher Randbedingungen. Ersichtlich ist, dass es trotz Optimierung nur selten *jedem* Fahrzeug  $v_i$  eine Energie in Höhe seines individuellen Energiebedarfs  $E_{v_i}$  über die positionierten Ladestellen zugeführt werden kann. Bei größeren Szenarien mit großem Stichprobenumfang wird es fast immer Fahrzeuge geben, die ohne Stillstand  $v_{\text{Fzg}} = 0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  einen Untersuchungsraum durchqueren und somit für eine statische Energieübertragung nicht in Frage kommen. Daher wird die Nebenbedingung formuliert, dass die summierte Energie, die in alle Fahrzeuge zurückgeführt wird, größer sein muss als der summierte Energiebedarf aller Fahrzeuge. Die Zielfunktion 5.12 unterliegt daher der Nebenbedingung 5.13, die unter Berücksichtigung der Ladeleistung  $P_{\text{laden}}$  die potenziellen mit den erforderlichen Ladedauern in Relation setzt:

$$\sum_{v_i \in \mathcal{V}} \sum_{c_j \in \mathcal{C}} t_{v_i, c_j} x_{c_j} > \sum_{v_i \in \mathcal{V}} \frac{E_{v_i}}{P_{\text{laden}}}. \quad (5.13)$$

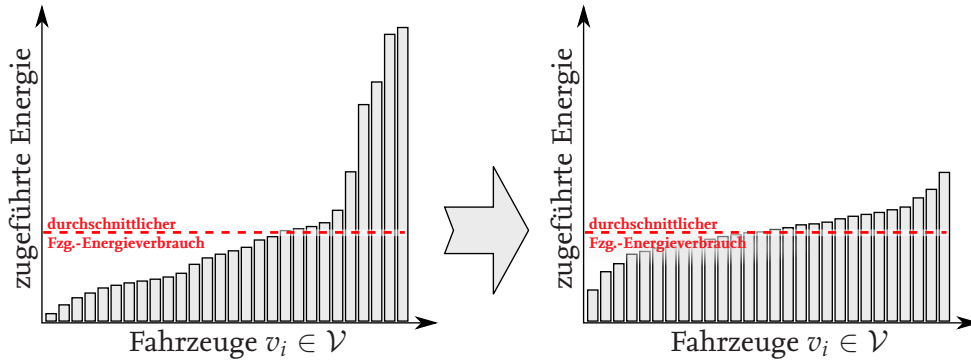


Abbildung 5.11.: Trotz einer durchschnittlich positiven Energiebilanz bleibt ein Großteil der Fahrzeuge energetisch unterversorgt, während die negative Bilanz über einen geringen Prozentsatz an Fahrzeugen durch eine extreme Überversorgung kompensiert wird (links). Durch Einführung der *Big-M-Methode* (rechts) wird die Nebenbedingung formuliert, dass eine definierte Anzahl der betrachteten Fahrzeuge individuell eine positive Energiebilanz aufweist. Dabei sinkt die Varianz der zugeführten Energie über die betrachteten Fahrzeuge: Die Energiebilanz der betrachteten Fahrzeuge wird homogenisiert.

Sie formuliert, dass mit einer Anordnung der Energieversorgungsinfrastruktur  $\underline{x}$  die kumulierte Ladedauer aller Fahrzeuge größer sein muss als die erforderliche Dauer, um den kumulierten Energiebedarf allen Fahrzeuge mit der Ladeleistung  $P_{\text{laden}}$  zuzuführen.

### 5.3.2.5. Homogenisierung der Fahrzeugenergiebilanzen

Mit dem in Gleichungen 5.12 und 5.13 formulierten linearen Programm wird eine anschließende Optimierung das Ziel haben, die Errichtungskosten einer Energieversorgungsinfrastruktur zu minimieren. Keine Berücksichtigung findet dabei die Verteilung der zugeführten Energien über die betrachtete Fahrzeugmenge  $\mathcal{V}$ . Es besteht die Möglichkeit, dass die über Ladestellen den Fahrzeugen zugeführte Energie nur auf einen kleinen Bruchteil der betrachteten Fahrzeuge verteilt wird (weil sich diese bspw. in einem Stau befinden), während ein Großteil der Fahrzeuge eine negative Energiebilanz im Untersuchungsraum aufweist. Fahrzeuge werden in diesen beiden Fällen als energetisch über- (Energiebilanz positiv) bzw. unterversorgt (Energiebilanz negativ) bezeichnet. Um diesem Effekt entgegenzuwirken und die Verteilung der Energien über die Fahrzeuge zu *homogenisieren*, wird eine zusätzliche Nebenbedingung formuliert, deren qualitatives Ziel in Abbildung 5.11 dargestellt ist. Dazu wird die sog. *Big-M-Methode* angewendet [Bazaraa et al., 2011; Griva et al., 2008].

Hierbei wird der Entscheidungsvektor  $\underline{x}$  mit einem (ebenfalls binären) Hilfsvektor  $\underline{y}$  ergänzt, welche nachfolgend gemeinsam einer Optimierung unterzogen werden. Diese Elemente  $y_{v_i} \in \{0, 1\}$  gewähren einem Fahrzeug  $v_i$  für die spätere Betrachtung einen Energie-*Bonus*. Dieser Bonus ist für Fahrzeuge vorgesehen, die energetisch unterversorgt sind. Darüber hinaus wird die Variable  $p^+ \in \mathbb{R}[0, 1]$  eingeführt, die den maximal zulässigen Prozentsatz von Fahrzeugen mit einer positiven Energiebilanz festlegt. Bei der Betrachtung eines Szenarios mit  $|\mathcal{V}| = n$  Fahrzeugen





spezifischen Energiebedarf nicht höher für das Erreichen einer positiven Energiebilanz priorisiert werden als die restlichen Fahrzeuge, werden diese hinsichtlich ihres spezifischen Energiebedarfs in  $k_{sE}$  Energiebedarfsklassen unterteilt. Für jede Klasse wird das beschriebene lineare Programm mit den Gleichungen 5.12, 5.13 und 5.14 formuliert und eine Teillösung ermittelt. Die endgültige Lösung ergibt sich aus der Vereinigung aller Teillösungsmengen.

Vorteil des in diesem Kapitel vorgestellten Verfahrens ist, dass es nicht nur bei Trajektorien aus mikroskopischen Verkehrssimulationen zur Anwendung kommen kann, sondern auch bei der Auswertung von Trajektorien aus dem Realverkehr, die bspw. mittels GPS erhoben wurden und in Form von *floating car data* vorliegen. Es erfordert jedoch ein vorliegendes Modell der Verkehrswegeinfrastruktur.

# 6 Modellierung eines Referenzszenarios

Unter Nutzung der in Kapitel 2 bis 4 vorgestellten Grundlagen, soll in diesem Kapitel die Erstellung eines mikroskopischen Referenzverkehrsszenarios beschrieben werden, an dem das in Kapitel 5 vorgestellte Optimierungsverfahren anschließend durchgeführt wird. Es gliedert sich in sechs Abschnitte und beginnt mit Abschnitt 6.1, in der die Anforderungen an einen Untersuchungsraum formuliert werden. Anschließend wird in Abschnitt 6.2 die Verkehrsinfrastruktur im gewählten Untersuchungsraum beschrieben. Es folgt in Abschnitt 6.3 die Modellierung der betrachteten Verkehrsteilnehmer, die für eine Berechnung des Energiebedarfs auch die erforderliche Parametrierung des eingeführten Energiemodells beinhaltet. Abschnitt 6.4 widmet sich der Modellierung der Verkehrsnachfrage. Anschließend wird in Abschnitt 6.5 das Vorgehen bei der Kalibrierung erläutert und das kalibrierte Referenzszenario validiert. Für die anschließende Optimierung werden in Abschnitt 6.6 zuletzt die Systemparameter der zu platzierenden Komponenten der Energieversorgungsinfrastruktur festgelegt. Die Erstellung des Verkehrsszenarios erfolgt werkzeuggestützt mit eNetEditor, welches in den Kapiteln 2 und 3 beschrieben ist. Anschließend kann eine Simulation des Szenarios mit SUMO erfolgen.

## 6.1. Auswahl eines Untersuchungsraums

Als Beispiel wird in dieser Arbeit die Integration und Platzierung von induktiven Ladestellen betrachtet. Um ein aussagekräftiges und auf andere städtische Verkehrssysteme übertragbares Ergebnis zu erzielen, muss ein beispielhafter Untersuchungsraum einer Reihe an Anforderungen genügen. Zum einen muss *städtischer* Verkehr betrachtet werden. Der Untersuchungsraum sollte den Verkehr in oder in Teilen einer Stadt beinhalten, deren *Demografie eine Vielzahl anderer Städte Deutschlands oder Europas repräsentiert*, so dass Kleinstädte und Ballungsräume ausgeschlossen werden. Zum anderen sollte der Untersuchungsraum eine Reihe an *verschieden klassifizierten Verkehrswegen* von Erschließungs- bis hin zu Bundesstraßen enthalten. Darüber hinaus ist für die Zwecke der Validierung von Vorteil, wenn im Untersuchungsraum *umfangreiche Verkehrsmess- und -zähleinrichtungen* vorhanden sind.

Für die Anwendung des entwickelten Optimierungsverfahrens wird daher ein Ausschnitt aus dem östlichen Braunschweiger Stadtgebiet als Untersuchungsraum gewählt, der in Abbildung 6.1 dargestellt ist. Der Fokus liegt dabei auf den primären und sekundären Zubringern der Forschungskreuzung am Rebenring/Hagenring, an der umfangreiche Sensorsysteme des DLR die Verkehrssituation erfassen, um daraus das Verhalten von Verkehrsteilnehmern zu untersuchen und deren Modelle zu optimieren [Schnieder und Lemmer, 2014a]. Das Referenzszenario beinhaltet einen Großteil des östlichen Ringgebiets sowie Bereiche der Innenstadt und Nordstadt. Im Untersuchungsraum wird der motorisierte Straßenverkehr unter Berücksichtigung des



Abbildung 6.1.: Ausschnitt aus dem östlichen Braunschweiger Stadtgebiet als Untersuchungsraum

Individualverkehrs sowie von Fahrzeugen des ÖPNVs und deren betrieblichen Eigenschaften betrachtet. Zu diesen gehören u. a. die induktiv geladenen Busse, die im Rahmen der Projekte *emil* und *InduktivLaden* auf der Linie M19 betrieben werden. Das resultierende mikroskopische Verkehrsszenario bildet in erster Linie den Verkehr während der morgendlichen Hauptverkehrszeit eines (gemäß [Müller et al., 2013]) *typischen* Werktags nach. Es wird daher der Zeitraum zwischen 07:00 und 09:30 Uhr der Wochentage Dienstag, Mittwoch und Donnerstag betrachtet. Mit einer Optimierung wird anschließend die Verortung der Komponenten einer induktiven Energieversorgungsinfrastruktur für die betrachteten Verkehrsteilnehmer vorgenommen.

## 6.2. Modellierung und Parametrierung der Verkehrsinfrastruktur

Um den Verkehr im Untersuchungsraum realitätsgetreu darzustellen, ist die vorherrschende Verkehrsinfrastruktur in einem Modell nachzubilden. Hierzu zählt in erster Linie die Verkehrswegeinfrastruktur, die grundsätzlich mit einer Adjazenzmatrix oder deren Graph dargestellt werden kann. Einzelne Knoten und Kanten müssen darüber hinaus mit Eigenschaften attribuiert werden, um den real vorherrschenden Verkehr sowie Verkehrsregeln im Modell nachbilden zu können. Bei der Modellierung von Kanten muss bspw. auf die korrekte Anzahl von Fahrstreifen sowie die zulässige Maximalgeschwindigkeit geachtet werden. Bei der Modellierung von Knoten muss für die spätere Modellvalidität vor allem die Verkehrsregelung korrekt dargestellt werden, wie bspw. zulässige Fahrstreifenverbindungen. Im Untersuchungsraum wird zwischen lichtsignalgesteuerten und prioritäts- sowie *Rechts-vor-Links*-geregelten Knotenpunkten

differenziert. Valide Ergebnisse über den Energiebedarf einzelner Fahrzeuge erfordern darüber hinaus die Attribuierung von Knoten mit einer Höhe über Normalhöhennull. Da diese jedoch besonders in stark profilierten Untersuchungsräumen relevant sind, wird die Höhe für die weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit vernachlässigt und eine konstante Höhe über Normalhöhennull angenommen.

Die Modellierung der Verkehrswegeinfrastruktur kann durch Zuhilfenahme von Geoinformationssystemen erfolgen, wie bspw. OpenStreetMap und Google Maps [Google Inc., 2016; OpenStreetMap Foundation, 2016]. Für die Parametrierung der Lichtsignalzeit- und -zustandspläne wurden eigene Erhebungen durchgeführt und diese mit dem Abschlussbericht *Umweltorientiertes Verkehrsmanagement Braunschweig* der Förderinitiative *Mobilität 21* in [Thiesing, 2010] verglichen, in dem einige stichprobenartige Parameter der Lichtsignalanlagen im Untersuchungsraum dargestellt sind. Die Steuerung der Lichtsignalanlagen im Braunschweiger Stadtgebiet zeichnet sich durch eine Zyklusdauer von 85 s aus. Die Erhebungen sind im Anhang unter Abschnitt B dokumentiert. Für die Abbildung öffentlicher Verkehrsprozesse ist zudem die Definition von Haltestellen erforderlich, von denen sich 30 im Untersuchungsraum befinden. Die Modellierung der beschriebenen Verkehrsinfrastrukturkonstituenten wurde grafisch in eNetEditor vorgenommen. Abbildung 6.2 zeigt den resultierenden Graph der Verkehrswegeinfrastruktur im Untersuchungsraum in eNetEditors grafischer Benutzeroberfläche.

### 6.3. Modellierung und Parametrierung der Verkehrsteilnehmer

Für die Parametrierung der Fahrzeugtypverteilungen wurden ebenfalls Erhebungen im Untersuchungsraum durchgeführt. Bei dem resultierenden Szenario wird zwischen den Fahrzeugklassen PKW und LKW unterschieden. Die im Untersuchungsraum während der morgendlichen Hauptverkehrszeit beobachteten Fahrzeuge setzen sich zu 97.3 % aus PKW und zu 2.7 % aus LKW zusammen. Für die Realitätstreue des zu entwickelnden Referenzszenarios wurde darüber hinaus die weitere Zusammensetzung der beiden Fahrzeugklassen untersucht. Mit dem Fokus auf der repräsentativen Nachbildung des Fahrzeugennergiebedarfs wird abweichend zu den in [Kunz, 2012] als '5 + 1' oder '8 + 1' eingeführten Fahrzeugklassen die in Tabelle 6.1 gezeigte Fahrzeugtypunterteilung gewählt, in der ihre erhobenen Zusammensetzungen aufgelistet sind. Für die Modellierung der Fahrzeugfolge- und Spurwechselverhalten kommen bei der mikroskopischen Verkehrssimulation die in [Krauß, 1998] und [Krajzewicz, 2009] vorgestellten Modelle zur Anwendung. Es wurden repräsentative Parameterwerte gewählt, um das Verhalten der eingeführten Fahrzeugtypen mit den verwendeten Modellen bestmöglich zu beschreiben. Gleiches trifft für die Berechnung des Fahrzeugennergiebedarfs zu, die für jeden eingeführten Fahrzeugtyp eine repräsentative Parametrierung des zugehörigen Energiemodells erfordert.

### 6.4. Modellierung und Parametrierung der Verkehrsnachfrage

Für die simulative Nachbildung des Verkehrs müssen die Verkehrsnachfrage im Untersuchungsraum ggf. ermittelt und verfügbare Daten analysiert werden, um daraus die Objekte einzelner Verkehrsmittel in der Simulation zu instanziiieren. Im Rahmen dieser Arbeit



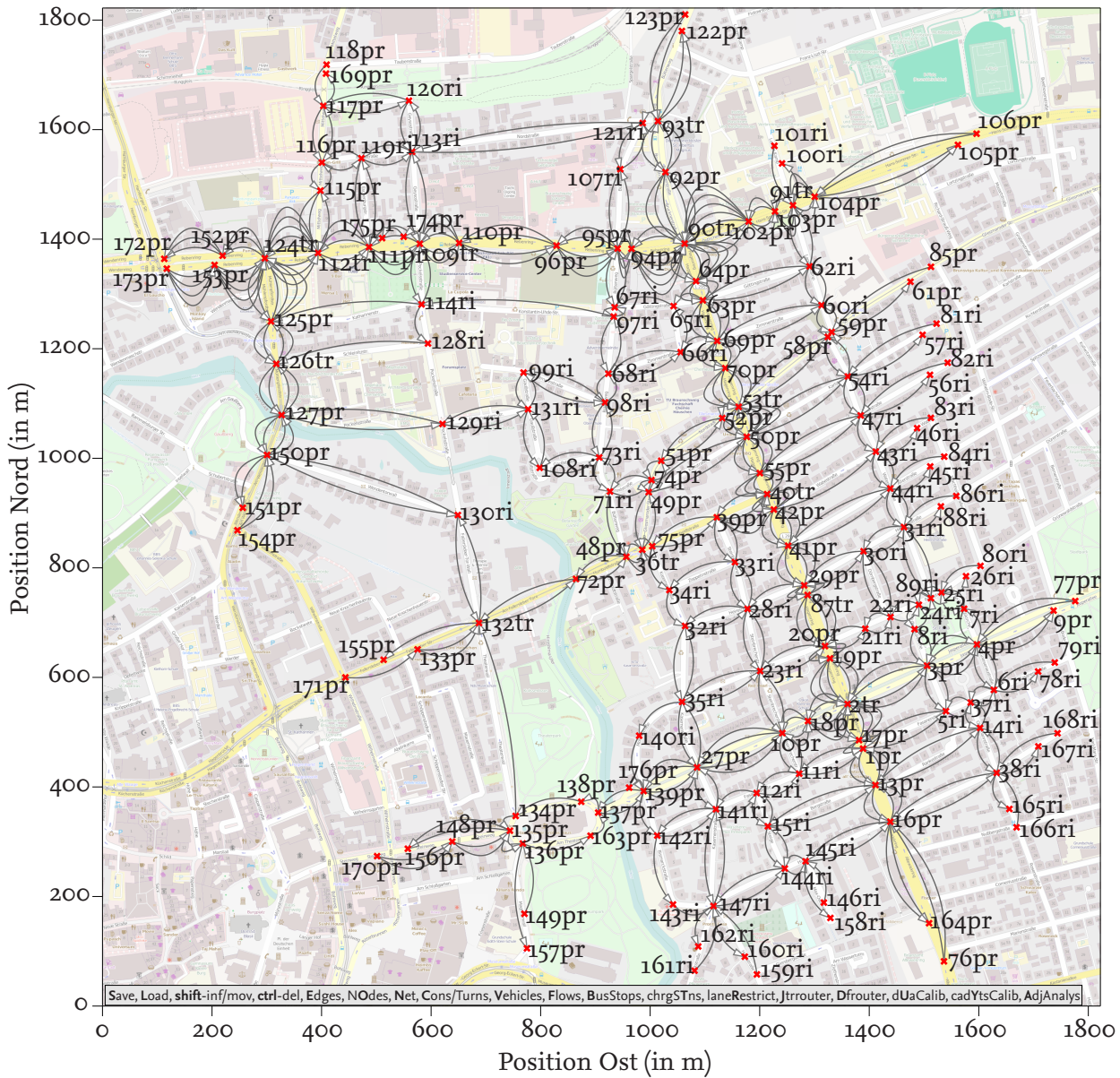


Abbildung 6.2.: Graph der Verkehrswegeinfrastruktur im Untersuchungsraum dargestellt in eNetEditors grafischer Benutzeroberfläche



Tabelle 6.1.: Relative Häufigkeit der berücksichtigten Fahrzeugklassen und Fahrzeugtypen

Fahrzeugklasse	Fahrzeugtyp	proz. Anteil
Personenkraftwagen	Fließheck-Limousine	37 %
	Stufenheck-Limousine	11 %
	Kombi-Limousine	26 %
	Großraum-Limousine	19 %
	Kleintransporter	7 %
Lastkraftwagen	Transporter	57 %
	Pritschenwagen	22 %
	Bus	8 %
	Sattelmkraftfahrzeug	13 %

97.3 %

2.7 %

wurde hierfür die Verkehrsmengenkarte der Stadt Braunschweig genutzt, die im Auftrag der Stadt Braunschweig von der WVI GmbH<sup>(1)</sup> im Jahr 2009 erstellt wurde [WVI GmbH, 2009]. In der Verkehrsmengenkarte wird die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (kurz: DTV, in Fahrzeugen pro 24 h) entlang berücksichtigter Kanten grafisch dargestellt. Abbildung 6.3 (links) zeigt einen Ausschnitt aus dieser Verkehrsmengenkarte der Stadt Braunschweig, der den Untersuchungsraum beinhaltet.

Für die Instanziierung einzelner Fahrzeugobjekte werden in einem ersten Schritt nur Verkehrsflüsse auf ein-/ausfließenden Kanten des Untersuchungsraums berücksichtigt, die sich (sofern zwei Fahrtrichtungen existieren) zu gleichen Teilen auf beide Fahrtrichtungen aufteilen. Fahrzeugrouten werden probabilistisch mit JTRROUTER (siehe Abschnitt 2.4.3) ermittelt. Die hierfür erforderlichen Abbiegewahrscheinlichkeiten an Kreuzungen werden unter Verwendung der in der Verkehrsmengenkarte [WVI GmbH, 2009] dokumentierten Verkehrsflüsse und einer linearen Optimierung geschätzt, die im Anhang unter Kapitel C beschrieben ist und anschließend mit stichprobenhaften Erhebungen im Untersuchungsraum validiert. Instanziierten Fahrzeugobjekten wird gemäß der in Tabelle 6.1 gelisteten Wahrscheinlichkeiten ein Fahrzeugtyp zugewiesen. Bei der Instanziierung von Fahrzeugen folgt die Verkehrsstärke der in [FGSV, 2001] (Abbildung 2-4) dargestellten Tagesganglinie, die dort als *TGw2West* bezeichnet wird. Der Verlauf dieser Tagesganglinie ist in Abbildung 6.3 (rechts) gezeigt. Die aus den definierten Verkehrsflüssen und Abbiegewahrscheinlichkeiten resultierenden Fahrzeugrouten werden für die weitere Erstellung des Referenzszenarios als Fahrten (eingeführt unter Abschnitt 2.4.3 und definiert durch Fahrzeugtyp, Quelle, Ziel und Abfahrtzeitpunkt) betrachtet, die sich zur gesamten Verkehrsnachfrage im Untersuchungsraum zusammensetzen. Mit dem Ziel, das Verkehrsverhalten im Untersuchungsraum repräsentativ nachzubilden, wird die weitere Kalibrierung der Verkehrsnachfrage und ihres Verhaltens im folgenden Abschnitt 6.5 beschrieben.

Da der ÖPNV einen maßgeblichen Einfluss auf den städtischen Verkehr hat, werden die entsprechenden Straßenfahrzeuge im Referenzszenario betrachtet. Als Datenquelle für die zu instanziiierenden Fahrzeuge dienen zum einen die Fahrpläne aller Linien, deren Routen durch den Untersuchungsraum führen. Zum anderen wurden im Rahmen der Projekte *emil* und *InduktivLaden* mehrere Busse der Braunschweiger Verkehrs-GmbH mit einem Datenlogger ausgestattet, mit

<sup>(1)</sup>WVI Prof. Dr. Wermuth Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung GmbH

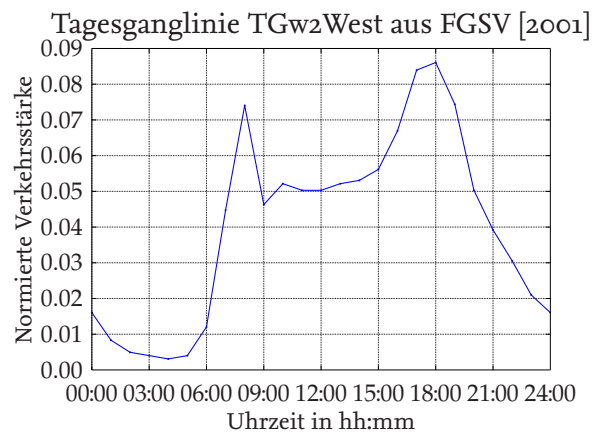


Abbildung 6.3.: Darstellung des Untersuchungsraums mit Hilfe der Braunschweiger Verkehrsmengenkarte [WVI GmbH, 2009] (links); Tagesganglinie TGw2West aus [FGSV, 2001] (rechts)

denen die Trajektorien der Fahrzeuge aufgezeichnet werden. Diese Daten geben nach einer Auswertung Aufschluss über das Verhalten der betrachteten Fahrzeuge im Braunschweiger Stadtverkehr und werden für die Parametrierung der Fahrzeughalte an Haltestellen sowie für die Kalibrierung ihrer mikroskopischen Verhaltensmodelle genutzt. In Abbildung 6.4 werden hierfür die ermittelten Verteilungen der Haltestellenaufenthaltsdauern an vier Haltestellen im Untersuchungsraum gezeigt, die der Parametrierung instanziierten ÖPNV-Fahrzeuge dienen. Da die Fahrzeuge des ÖPNV feste Routen haben, werden diese von der folgenden Routenkalibrierung ausgenommen. Die im Untersuchungsraum befindlichen Schienenfahrzeuge des ÖPNV<sup>(2)</sup> werden nicht betrachtet und ihre Einflüsse auf den übrigen Verkehr vernachlässigt.

## 6.5. Makro- und mikroskopische Kalibrierung des Verkehrs- und Fahrzeugverhaltens

Für die Erstellung eines repräsentativen Verkehrsszenarios wurde in Anlehnung an [Detering, 2011] ein iteratives Verfahren für die Kalibrierung des makroskopischen als auch des mikroskopischen Fahrzeug- und Verkehrsverhaltens entwickelt. Ziel ist es, dass Fahrzeugrouten gemäß einer Heuristik ermittelt werden, die sich an den Entscheidungsfindungen im realen Verkehr anlehnt. Darüber hinaus sollen mit dem Verhalten der simulierten Fahrzeuginstanzen sowohl gemessene Fahrtauern und Verkehrsflüsse auf Kanten als auch die ermittelten Verteilungen von positionsabhängigen Haltedauern vor lichtsignalgesteuerten Kreuzungen realitätsnah nachgebildet werden.

<sup>(2)</sup>Die Braunschweiger Tram-Linie M3 verkehrt in den Hauptverkehrszeiten im 7.5-Minuten-Takt zwischen Weststadt und Volkmarode. Die Fahrzeuge durchqueren dabei den Untersuchungsraum entlang des Bohlwegs, der Fallersleber Straße sowie der Gliesmaroder Straße und erhalten Vorrang an vielen lichtsignalgesteuerten Kreuzungen.

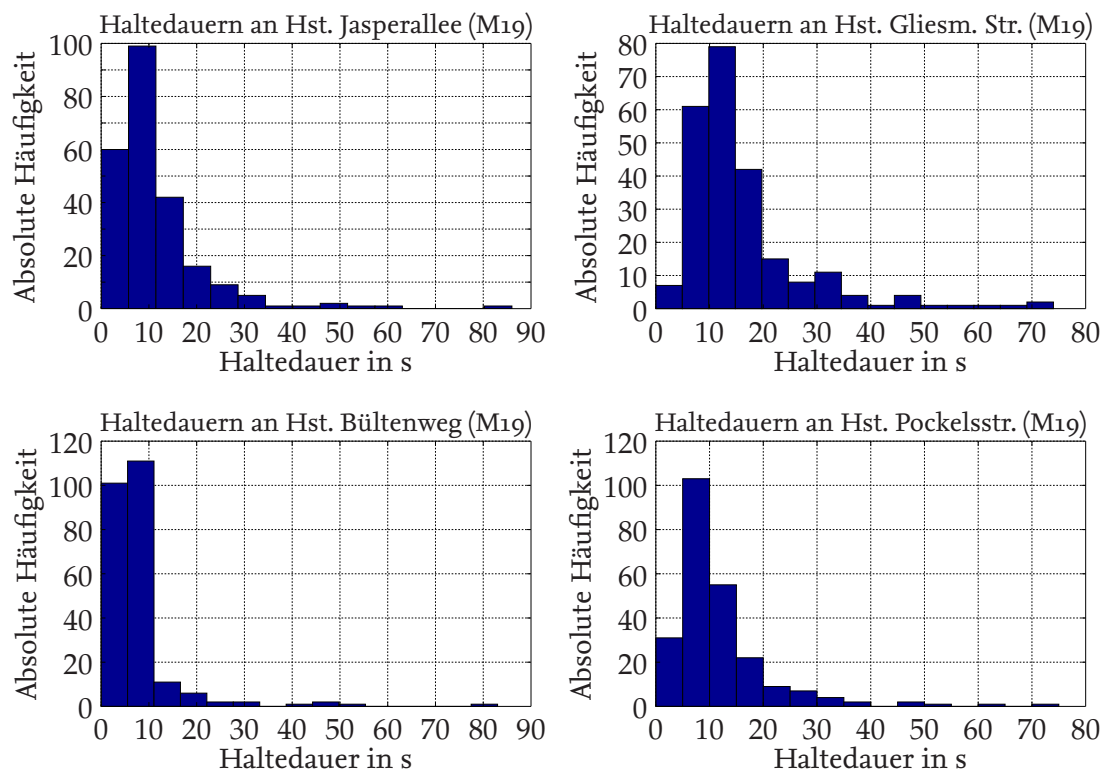


Abbildung 6.4.: Histogramme der Aufenthaltsdauern von ÖPNV-Fahrzeugen an vier ausgewählten Haltestellen im Untersuchungsraum (Stichprobenumfang  $n = 238$ )

### 6.5.1. Makroskopische Kalibrierung der Routenwahl (Schritt a)

Um mit der Referenzsimulation das makroskopische Verhalten in Form realer Verkehrsflüsse nachzubilden, wird das in [Flötteröd, 2009] vorgestellte und in Abschnitt 3.2.2 beschriebene Kalibrierungswerkzeug Cadyts genutzt. Als Datengrundlage für die realen Verkehrsflüsse dienen dabei Verkehrszählungen, die bspw. mittels Induktionszählschleifen ermittelt werden können. Die initiale aus Abbiegewahrscheinlichkeiten resultierende Schätzung der Verkehrsnachfrage wird zunächst mit dem in [Gawron, 1998b] vorgestellten DUAROUTER kalibriert, um das dynamische Nutzergleichgewicht (engl.: dynamic user equilibrium, kurz: DUE) iterativ zu ermitteln. Während dieser Kalibrierung werden für individuelle Fahrzeuginstanzen alternative Routen ermittelt, die Routen nach Kosten bewertet und anschließend an Cadyts [Flötteröd, 2009] für eine nachfolgende (ebenfalls iterative) Kalibrierung der Routenwahl bereitgestellt. Das Ziel der Kalibrierung mit Cadyts ist es, die gewählten Fahrzeugrouten in ein Gleichgewicht zu überführen, welches weitestgehend konsistent ist mit den in [WVI GmbH, 2009] dokumentierten Verkehrsflüssen. In Abbildung 6.5 wird die Entwicklung der simulierten Fahrzeugzählungen während der Routenkalibrierung mit Cadyts auf ausgewählten Straßen im Untersuchungsraum gezeigt und mit den verfügbaren Zählungen verglichen.

Abweichungen zwischen simulierten und (in Abbildung 6.5 mit Dreiecken gekennzeichneten) gemessenen Zählungen sind hauptsächlich auf zwei Faktoren zurückzuführen:

1. Bei den sog. *Zählungen* handelt es sich um Werte, die aus der in [WVI GmbH, 2009] dargestellten Braunschweiger Verkehrsmengenkarte synthetisch unter Annahme der

### Entwicklung der Fahrzeugzählungen auf ausgewählten Kanten im Untersuchungsraum

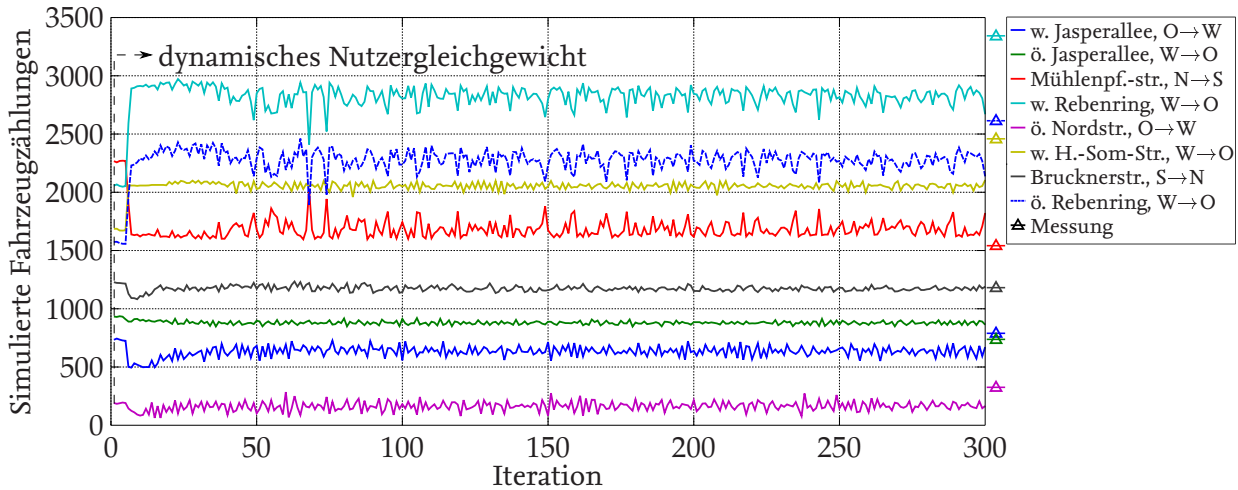


Abbildung 6.5.: Entwicklung der simulierten Fahrzeugzählungen auf ausgewählten Kanten im Untersuchungsraum bei einer Kalibrierung mit Cadyts über 300 Iterationen, beginnend mit dem dynamischen Nutzergleichgewicht; reale Fahrzeugzählungen sind rechts neben dem Diagramm mit einem Dreieck gekennzeichnet

Tagesganglinie *TGw2West* (aus [FGSV, 2001]) erstellt wurden. Die Verkehrsmengenkarte stammt aus einem Verkehrssimulationsmodell, welches auf Basis von Verkehrsmessungen erstellt wurde. Die dargestellten Verkehrsflüsse sind gerundet und Werte unter 2000 Fahrzeugen pro Tag nicht dargestellt. Folglich ist davon auszugehen, dass diese Inkonsistenzen beinhaltet.

- Die initiale Verkehrsnachfrage zu Beginn der Kalibrierung ergibt sich zu einem Großteil aus geschätzten Abbiegewahrscheinlichkeiten. Zur Validierung wurden exemplarische Abbiegewahrscheinlichkeiten erhoben. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die ermittelten Fahrten die vorherrschende Verkehrsnachfrage (in Form von Quellen und Zielen) im Untersuchungsraum nicht exakt widerspiegeln. Ferner ist damit zu rechnen, dass sich die erhobenen Abbiegewahrscheinlichkeiten von denen unterscheiden, die im Juni 2009 herrschten, als die Verkehrsmengenkarte erstellt wurde.

Das Ergebnis einer makroskopischen Kalibrierung mit Cadyts kann deutlich verbessert werden, wenn aktuelle und konsistente Messdaten vorliegen.

#### 6.5.2. Mikroskopische Kalibrierung auf mittlere ÖPNV-Fahrdauern (Schritt b)

In einem weiteren Kalibrierungsschritt werden Parameter des mikroskopischen Fahrzeugfolge-modells instanzierter Fahrzeugobjekte angepasst, um gemessene makroskopische Kenngrößen mit der Referenzsimulation nachzubilden. Hierfür wurde die mittlere Fahrdauer von ÖPNV-Fahrzeugen gewählt, deren Trajektorien mithilfe eines GPS-Empfängers und Datenloggers aufgezeichnet wurden. In Abbildung 6.6 sind die nach Abschnitten zwischen jeweils zwei Haltestellen segmentierten Durchschnittsgeschwindigkeiten von ÖPNV-Fahrzeugen dargestellt, die auf der Linie M19 betrieben wurden.

Zur Nachbildung des Verkehrs im Untersuchungsraum kommt bei der mikroskopischen

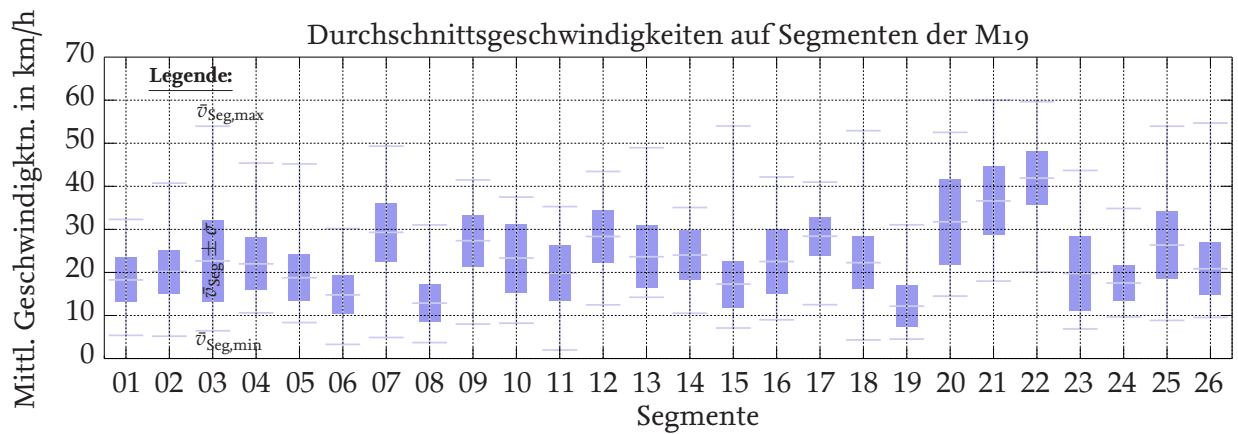


Abbildung 6.6.: Durchschnittliche Geschwindigkeiten auf Segmenten zwischen jeweils zwei Haltestellen der Buslinie M19

Tabelle 6.2.: Über die makroskopische Kalibrierung ermittelte Maximalbeschleunigungen der eingeführten Fahrzeugtypen

Fahrzeugtyp	$a_{\max}$
Fließheck-Limousine	$1.54 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Stufenheck-Limousine	$1.43 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Kombi-Limousine	$1.32 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Großraum-Limousine	$1.38 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Kleintransporter	$1.21 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Transporter	$0.77 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Pritschenwagen	$0.72 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Bus	$0.66 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Sattelkraftfahrzeug	$0.61 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Verkehrssimulation das in Abschnitt 2.4.2.2 beschriebene Safety-Distance Fahrzeugfolgmodell aus [Krauß, 1998] zur Anwendung, dessen Parameter in Tabelle 2.4 gelistet sind. Um die Fahrtauern in der Simulation in bestmögliche Übereinstimmung mit den erhobenen Messwerten zu bringen, wird die maximale Fahrzeugbeschleunigung als mikroskopische Kalibrierungsgröße gewählt. Für die maximale Beschleunigung der eingeführten Fahrzeugtypen wurden Initialwerte  $a_{\text{Fzg,ref}}$  angenommen. Die über eine Kalibrierung zu ermittelnden maximalen Fahrzeugbeschleunigungen ergeben sich aus  $a_{\text{Fzg}} = a_{\text{Fzg,ref}} \cdot k_a$ , wobei der Faktor  $k_a$  im Rahmen dieses Kalibrierungsschrittes variiert wird. Die Abweichung der mittleren Fahrtauern zwischen Simulation und Messung bildet das Fehlermaß für die Kalibrierung. Abbildung 6.7 zeigt eine Gegenüberstellung der Histogramme von gemessenen und simulierten ÖPNV-Fahrtauern auf dem Segment zwischen den Haltestellen Jasperallee und Giesmaroder Straße. Nach der ersten Iteration (**1b**) erfolgt eine Anpassung der maximalen Fahrzeugbeschleunigungen auf das  $k_a = 0.55$ -fache ihrer ursprünglichen Werte  $a_{\text{Fzg,ref}}$ , durch die das Fehlermaß von  $-30.5 \text{ s}$  auf  $-2.6 \text{ s}$  gesenkt werden kann. Die resultierenden maximalen Fahrzeugbeschleunigungen nach diesem Iterationsschritt sind in Tabelle 6.2 aufgelistet.



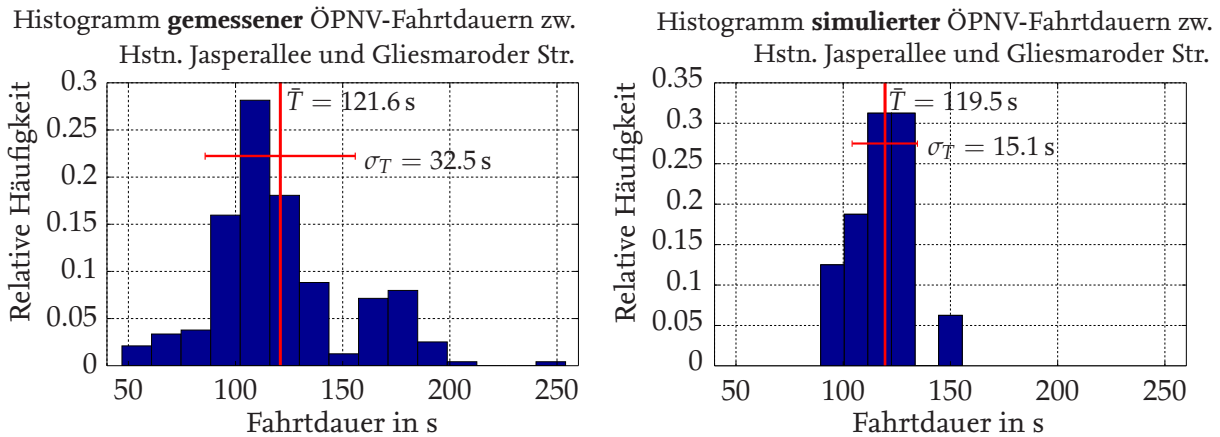


Abbildung 6.7: Histogramme der gemessenen und simulierten Fahrtdauern von Fahrzeugen des ÖPNV auf dem Segment zwischen den Haltestellen Jasperallee und Gliesmaroder Straße nach mikroskopischer Kalibrierung der Fahrzeugbeschleunigungen (Schritt b)

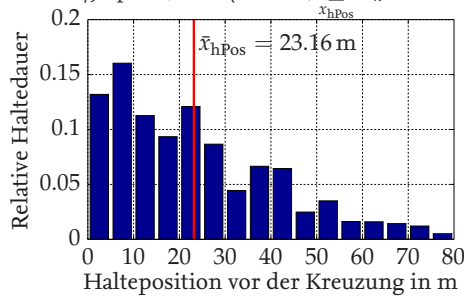
### 6.5.3. Mikroskopische Kalibrierung auf die Haltedauerverteilung vor lichtsignalgesteuerten Kreuzungen (Schritt c)

Um in der Simulation realistische Fahrzeughaltepositionen vor Kreuzungen zu reproduzieren, an denen eine Energieübertragung und somit die Platzierung von Ladestellen in Frage kommen, muss das Fahrzeug- bzw. Fahrerverhalten von Fahrzeugen in einem nächsten Schritt kalibriert werden. Hierfür werden über GPS-Messungen ermittelte Fahrzeugtrajektorien ausgewertet. Bei den betrachteten Fahrzeugen handelt es sich zum einen um die von der Braunschweiger Verkehrs-GmbH betriebenen Elektrobusse, die im Rahmen der Förderprojekte *emil* und *InduktivLaden* auf der Braunschweiger Linie M19 eingesetzt werden, und zum anderen um ein Elektro-PKW (Volkswagen eGolf), der im Untersuchungsraum betrieben wurde. Da sich Fahrzeughalte insb. vor Lichtsignalanlagen ergeben, werden aus den erhobenen Fahrzeugtrajektorien die positionsabhängigen Histogramme der für eine Energieübertragung nutzbaren Haltedauern vor Lichtsignalanlagen ausgewertet. Vier beispielhafte Histogramme sind in Abbildung 6.8 dargestellt. Dadurch, dass mehrere Elektrobusse über eine größere Dauer im ÖPNV betrieben wurden, ist der Stichprobenumfang der erfolgten Halte deutlich größer als bei dem Elektro-PKW.

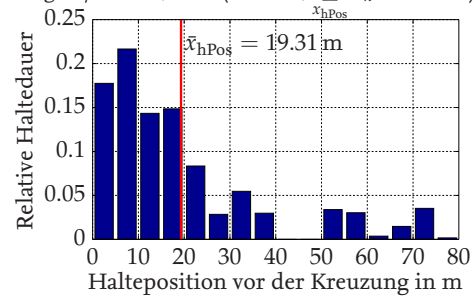
Von den Parametern des in [Krauß, 1998] vorgestellten und hier genutzten Fahrzeugfolgemo-dells hat der Fahrzeugfolgeabstand den größten Einfluss auf die Verteilung der Haltepositionen von Fahrzeugen in einem Rückstau, der sich bspw. vor Lichtsignalanlagen oder Kreuzungen bildet. Der Folgeabstand wird daher als mikroskopische Kalibrierungsgröße gewählt. Die Charakteristik der in Messfahrten und der mikroskopischen Simulation beobachteten Verteilungen der Fahrzeughaltedauern über deren Haltepositionen ähneln sich bereits ohne vorherige mikroskopische Kalibrierung sehr stark. Als kombiniertes Fehlermaß für die Kalibrierung wird daher die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (RMSE) der mittleren Haltepositionen zwischen Simulation und Messung über mehrere Kreuzungen im Untersuchungsraum gewählt. In Abbildung 6.9 sind dazu die Histogramme der Fahrzeughaltedauern in Abhängigkeit der Haltepositionen vor zwei Kreuzungen nach der erfolgten Kalibrierung dargestellt. Zur Minimierung des Fehlermaßes wird nach der ersten Iteration (**I1c**) der minimale Folgeabstand (bei



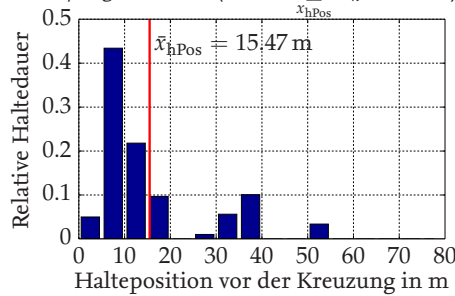
Histogr. positionsabh. ÖPNV-Haltdauern vor LSA  
Altewiekr./Jasperl., S->N ( $n = 206$ ,  $\sum T_h = 6341$  s)



Histogr. positionsabh. ÖPNV-Haltdauern vor LSA  
Hagen-/Rebenr., S->N ( $n = 495$ ,  $\sum T_h = 14102$  s)



Histogr. positionsabh. eGolf-Haltdauern vor LSA  
Reben-/Hagenr., W->O ( $n = 13$ ,  $\sum T_h = 508.2$  s)



Histogr. positionsabh. eGolf-Haltdauern vor LSA  
Hagenr./Humb.str., S->N ( $n = 14$ ,  $\sum T_h = 289.8$  s)

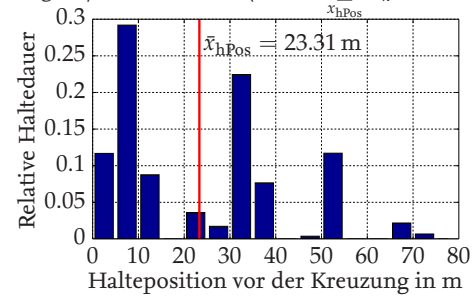
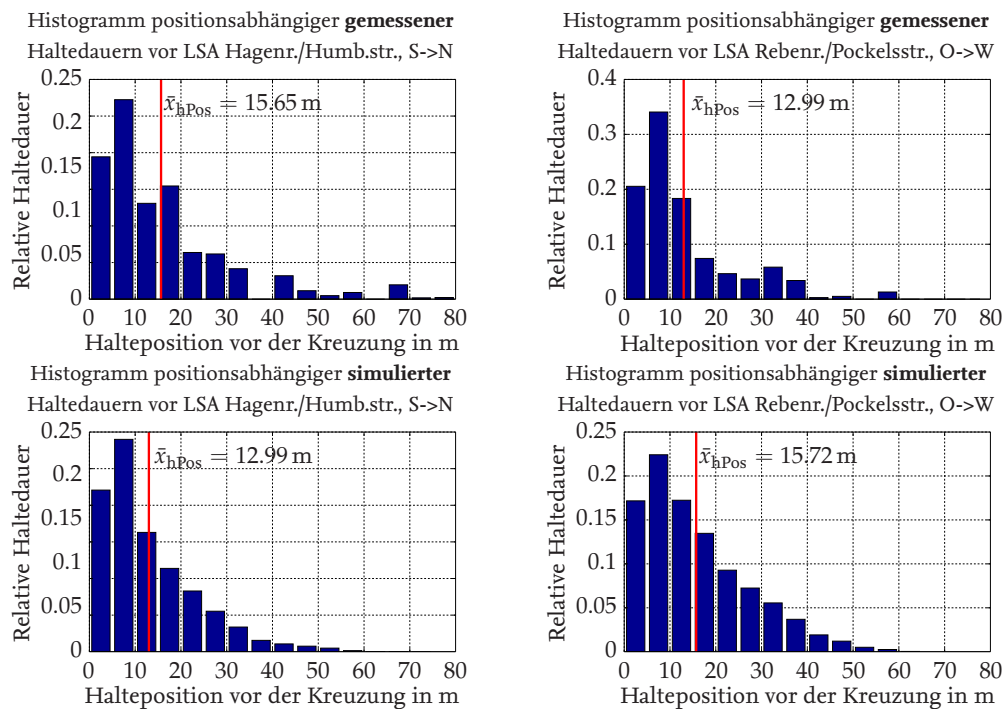


Abbildung 6.8.: Histogramme der Fahrzeughaltdauern über die Halteposition vor verschiedenen lichtsignalgesteuerten Kreuzungen im Untersuchungsraum, resultierend aus ausgewerteten Trajektorien von ÖPNV-Fahrzeugen (oben) sowie des Elektro-PKWs (unten); der Stichprobenumfang  $n$  gibt die Anzahl der erfolgten Halte vor der betrachteten Lichtsignalanlage an; die Klassenbreite der Haltepositionen beträgt jeweils 5 m



Abbildungung 6.9.: Gegenüberstellung der Histogramme der gemessenen sowie simulierten positionsabhängigen Haltedauern vor den Lichtsignalanlagen Hagenring/Humboldtstraße (Fahrtrichtung von Süden nach Norden) sowie Rebenring/Pockelsstraße (Fahrtrichtung von Westen nach Osten) nach mikroskopischer Kalibrierung des Fahrzeugfolgeabstands (Schritt c)

Fahrzeugstillstand) von 1.5 m auf 0.325 m reduziert, wodurch das Fehlermaß von 5.18 m auf ein Minimum von 2.59 m gesenkt werden kann.

#### 6.5.4. Iterativer Ablauf

Die Kalibrierung der mikroskopischen Fahrzeugverhaltensmodelle hat wiederum einen Einfluss auf das makroskopischen Verhalten des Szenarios und folglich auf die Optimalität der Routenwahl. Während Fahrzeugrouten im Rahmen der mikroskopischen Kalibrierung nicht geändert werden und somit weiterhin kollektiv hinsichtlich des beschriebenen Tagesgangprofils valide sind, birgt eine erneute Optimierung der Routenwahl mit Cadyts das Potenzial, die Fahrtdauern und die Kosten für die von den simulierten Verkehrsteilnehmern gewählten Routen zu senken. Da die makroskopische Kalibrierung wiederum Auswirkungen auf die Fahrzeughalte hat, werden die drei hier vorgestellten Kalibrierungsschritte in einen iterativen Kalibrierungsprozess eingebunden, der so lange durchgeführt werden muss, bis sich ein stabiler Systemzustand eingestellt hat, der anschließend zu validieren ist.

In Abbildung 6.10 wird ausgehend vom dynamischen Nutzergleichgewicht, gekennzeichnet mit **I0 (DUE)**, das Phasendiagramm der Fehlermaße bei der iterativen Kalibrierung gezeigt, die im Rahmen dieser Arbeit für die Erstellung des Referenzszenarios durchgeführt wird. Der Verlauf der dabei variierenden Parameterwerte ist in Abbildung 6.11 dargestellt. Es zeigt sich, dass bereits nach der vierten Iteration nur inkrementelle Verbesserungen der Fehlermaße zu erzielen sind, so dass die Kalibrierung an dieser Stelle beendet wird. Nach Abschluss der Kalibrierung liegt die Routenlänge

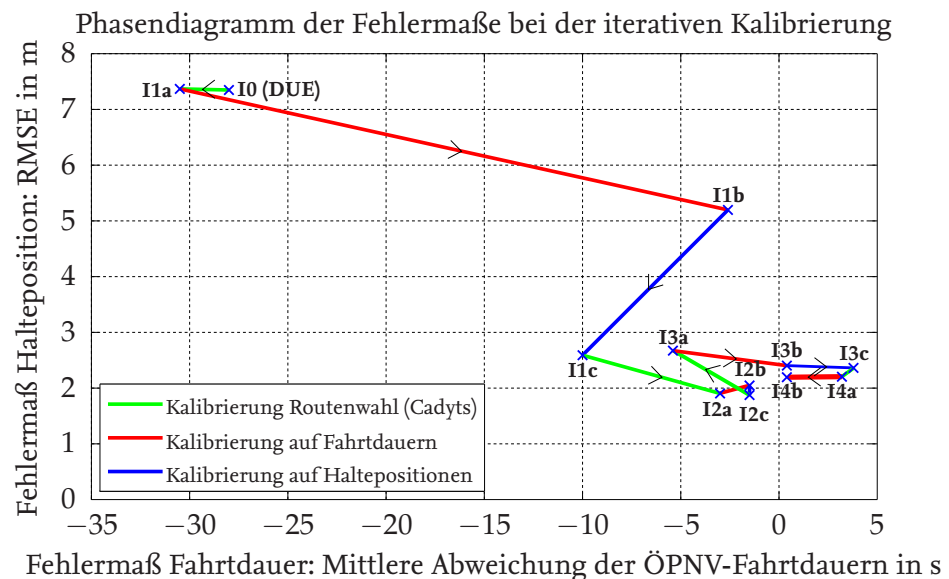


Abbildung 6.10.: Phasendiagramm der Fehlermaße Fahrtdauer und mittlere Halteposition während der iterativen Kalibrierung

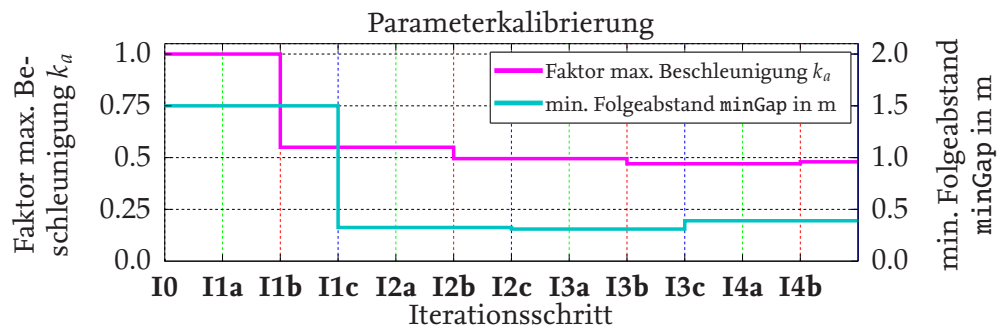


Abbildung 6.11.: Verlauf der Fahrzeugfolgemodelparameter während der iterativen Kalibrierung

der simulierten Verkehrsmittel bei 1.31 km.

### 6.5.5. Validierung und kritische Würdigung

Für eine Validierung werden die Histogramme weiterer positionsabhängiger Haltedauern vor Lichtsignalanlagen und die daraus resultierenden Abweichungen der mittleren Haltepositionen zwischen Messung und Simulation ausgewertet, die im Fehlermaß der Kalibrierung nicht betrachtet sind. In Abbildung 6.12 sind dazu beispielhaft die gemessenen und simulierten Histogramme der Haltedauern vor der Lichtsignalanlage Hagenring/Gliesmaroder Straße gegenübergestellt. Der absolute Fehler beträgt dort 0.90 m bei einer prozentualen Abweichung von 8.44 %.

Die Verteilung der Fahrzeughaltedauern vor Lichtsignalanlagen wird neben dem Fahrzeugfolgeverhalten maßgeblich von den über die makroskopische Kalibrierung ermittelten Fahrzeugrouten beeinflusst, insb. von den zuvor definierten Abbiegewahrscheinlichkeiten an Kreuzungen. Da das über die makroskopische Kalibrierung mit Cadyts ermittelte Optimum nicht notwendigerweise das reale Verkehrsverhalten widerspiegelt, ist an den entsprechenden

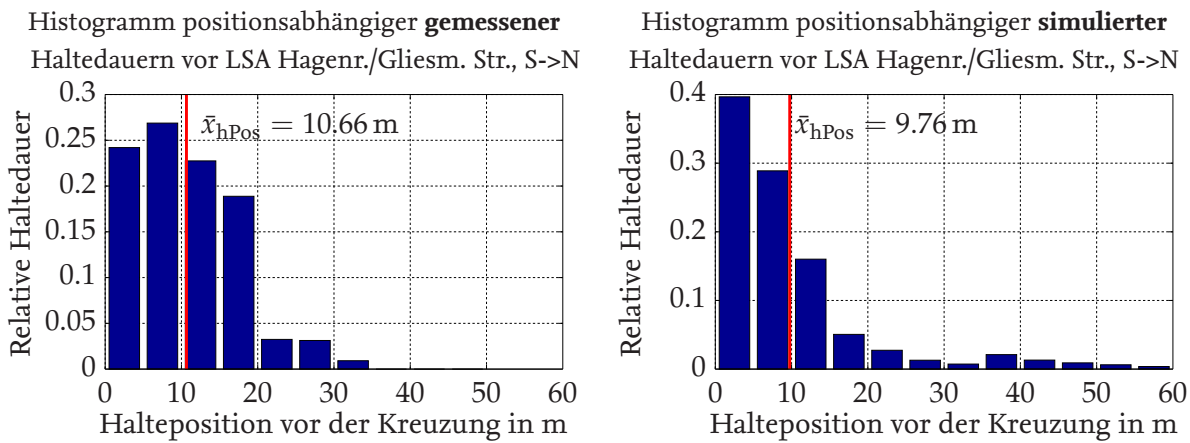


Abbildung 6.12.: Validierung der mikroskopischen Kalibrierung durch Gegenüberstellung der Histogramme der gemessenen sowie simulierten positionsabhängigen Haltedauern vor der Lichtsignalanlage Hagenring/Gliesmaroder Straße (Fahrtrichtung von Süden nach Norden) und Auswertung des Fehlermaßes

Kreuzungen mit Fehlern in der simulierten Verteilung von Haltedauern zu rechnen. Eine beispielhafte Gegenüberstellung von Messwerten zu Simulationsdaten wird in Abbildung 6.13 gezeigt, in der der prozentuale Fehler 51.84 % beträgt. Liegen Messdaten über die Rückstaulängen und/oder Abbiegewahrscheinlichkeiten in einem Untersuchungsraum vor, wäre bei der makroskopischen Kalibrierung der Fahrzeugrouten die Einführung eines Gütefunktionalis zielführend, welches diese Messgrößen berücksichtigt. Darüber hinaus sind die über die mikroskopische Kalibrierung ermittelten Parameterwerte des minimalen Folgeabstands und der maximalen Fahrzeugbeschleunigung einerseits physikalisch zulässig, andererseits liegen diese mit  $\text{minGap} = 0.39 \text{ m}$  und  $\text{accel} = 1.343 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  (für den Fahrzeugtyp Fließhecklimousine) unterhalb realistischer Werte. Diese Feststellung deckt sich mit den Beobachtungen und Erkenntnissen vorangehender Arbeiten, dass die Modellparameter des Fahrzeugfolgeverhaltens für eine valide Abbildung des Verkehrs oft unrealistische Werte annehmen müssen [Detering, 2011; FGSV, 2006; Krauß et al., 1997]. Gründe hierfür liegen unter anderem in der vereinfachten Modellierung des Fahr- und Folgeverhaltens sowie in der ausschließlichen Betrachtung von Durchgangsverkehr in der Referenzsimulation. Darüber hinaus bleiben Fahrradfahrer, Fußgänger sowie Straßenbahnen und insb. die daraus resultierenden Interaktionen mit motorisierten Straßenfahrzeugen in der Referenzsimulation unberücksichtigt.

Weitere Fehlerquellen während der Kalibrierung ergeben sich aus Messfehlern in der Fahrzeugortung, denen die erhobenen Fahrzeugtrajektorien unterliegen. Die räumlich diskretisierten Segmente der Verkehrsweeinfrastuktur werden in den in Abbildungen 6.8, 6.9, 6.12 und 6.13 dargestellten Histogrammen jeweils durch einen Balken mit der Klassenbreite von 5 m repräsentiert. Für eine Vergleichbarkeit zwischen Simulation und Messung müssen diese nach Möglichkeit identisch angeordnet sein. Darüber hinaus wird die mikroskopische Kalibrierung mangels mikroskopischer Fahrzeug- und Verkehrsdaten zum Teil auf Basis von verfügbaren makroskopischen Daten (durchschnittliche Fahrtdauern) durchgeführt, wodurch die mikroskopische Validität des Szenarios nicht gesteigert werden kann [Detering, 2011]. Trotz der aufgezeigten Schwächen bei der Kalibrierung und lokaler Abweichungen zum realen

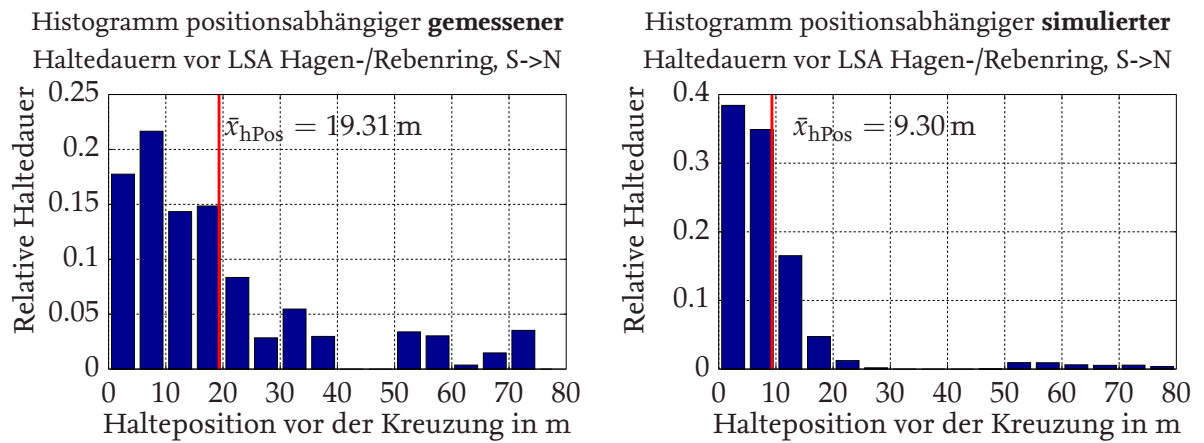


Abbildung 6.13.: Mikroskopische Validierung durch Gegenüberstellung der Histogramme der gemessenen sowie simulierten positionsabhängigen Haltedauern vor der Lichtsignalanlage Hagen-/Rebenring (nur Linksabbiegerfahrstreifen in Fahrtrichtung von Süden nach Norden) und Kennzeichnung des Mittelwertes

Verkehrsgeschehen zeigt sich, dass das entwickelte Referenzszenario den vorherrschenden Verkehr zu großen Teilen repräsentativ widerspiegelt und mit den gegebenen Mitteln kaum verbessert werden kann. Das Szenario wird daher für die späteren Optimierungszwecke genutzt.

#### 6.5.6. Parametrierung des Energiemodells zur Berechnung des Fahrzeugenergiebedarfs

Um Verkehrsmitteln über die zu optimierende Energieversorgungsinfrastruktur eine ausreichende Energiebereitstellung zu gewährleisten, ist die Kenntnis über deren Energiebedarf erforderlich. Zur Parametrierung des in Abschnitt 4.2 vorgestellten Energiemodells sind in Tabelle 6.3 die Parameterwerte für die in Abschnitt 6.3 eingeführten Fahrzeugtypen aufgelistet. Die Parameterwerte für den Fahrzeugtyp Bus stammen aus den in Abschnitt 4.2.5 dargestellten Ergebnissen. Die Parametrierung der übrigen Fahrzeugtypen erfolgte mit Informationen aus Datenblättern sowie Richtwerten aus [Mitschke, 2013; Pütz, 2012]. Das parametrisierte Modell berechnet in jedem Zeitschritt für jedes simulierte Verkehrsmittel den aus dessen Fahrverhalten resultierenden Energiebedarf. Jedes Verkehrsmittel ist kompatibel mit den zu verortenden Ladestellen und wird bei der Optimierung der Ladestellenanordnung berücksichtigt. Abbildung 6.14 stellt die räumliche Verteilung des kumulierten Energiebedarfs aller 18134 im Szenario betrachteten und simulierten Verkehrsmittel dar. Der (sowohl räumlich als auch über alle Fahrzeuge) kumulierte Energiebedarf beträgt 6.39 MWh.

### 6.6. Parametrierung der Energieversorgungsinfrastruktur

Um die Energieversorgungsinfrastruktur optimal anzuordnen, werden in diesem Abschnitt die Systemparameter ihrer Komponenten, die Randbedingungen des linearen Programms und anschließend das Optimierungsziel definiert. Nach der Ankunft eines kompatiblen Verkehrsmittels an einer Ladestelle wird der Ladevorgang vom Fahrer initiiert. Über eine Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestelle wird sowohl eine gegenseitige Authentifizierung als auch eine Überprüfung der korrekten Positionierung des Fahrzeugs über

Tabelle 6.3.: Parameter des Energiemodells für die in Abschnitt 6.3 eingeführten Fahrzeugtypen in der Referenzsimulation (Daten aus [Cordes, 2016; Mitschke, 2013; Pütz, 2012] sowie eigene Erhebungen)

Fahrzeugtyp → Modellparam. ↓		Fließ- hecklim.	Stufen- hecklim.	Kombi- lim.	Gross- raumlim.	Klein- tansp.	Trans- porter	Prit- schenw.	Bus	Sattel- kfr.
$E_{\text{Bat,max}}$	in kWh	20	20	30	50	50	70	80	90	90
$m_{\text{Fzg}}$	in t	1.5	1.5	1.8	2.5	3.5	7.5	10.0	20.0	20.0
$J_{\text{equiv}}$	in kg	300	300	300	400	400	500	750	946	1 000
$A_{\text{FzgStirn}}$	in m <sup>2</sup>	2.3	2.3	2.3	2.8	3.2	4.5	5	7.3	8.0
$c_w$	in [–]	0.33	0.36	0.33	0.40	0.45	0.45	0.50	0.60	0.60
$c_{\text{roll}}$	in [–]	0.017	0.017	0.017	0.015	0.012	0.010	0.010	0.011	0.008
$P_{\text{neben}}$	in kW	1.5	1.5	1.5	3.0	3.0	5.0	10.0	13.7	10.0
$\eta_{\text{vortr}}$	in [–]	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
$\eta_{\text{rekup}}$	in [–]	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85

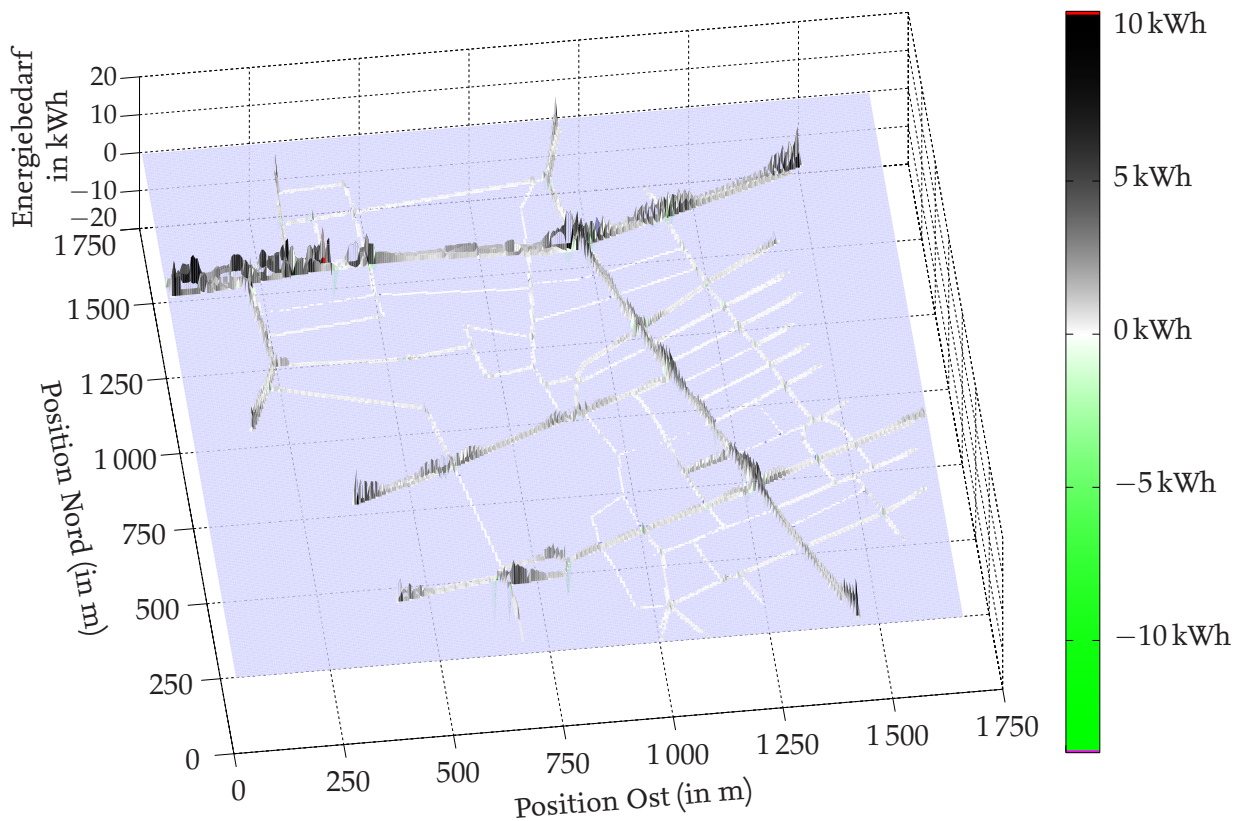


Abbildung 6.14.: Räumliche Verteilung des über alle Fahrzeuge kumulierten Fahrzeugenergiebedarfs (räumlich diskretisiert mit einer Auflösung von 5 m)



der Ladestelle vorgenommen. Um Streufelder während der Ladung zu minimieren, wird nach der Ladungsautorisierung die fahrzeugseitige Sekundärspule herabgesenkt und damit der Luftspalt reduziert. Durch die Bestromung der Primärspule beginnt die induktive Energieübertragung, die mit Leistungen von bis zu 200 kW erfolgen kann.

Um in der Simulation des Referenzszenarios das beschriebene Verhalten nachzubilden, werden für die von der Optimierung zu verortenden Ladestellen folgende Annahmen getroffen:

- Eine Energieübertragung kann nur während eines Fahrzeughalts bei  $v_{\text{Fzg}} = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  über einer Ladestelle erfolgen.
- Um die Authentifizierung und Autorisierung sowie das Herabsenken der fahrzeugseitigen Sekundärspule zu berücksichtigen, wird in der Referenzsimulation eine Initialisierungsdauer  $T_s = 5 \text{ s}$  angenommen, die nach jedem individuellen Fahrzeughalt verstreicht, bevor die Energieübertragung beginnt.
- Die Energieübertragung erfolgt für alle Verkehrsmittel mit einer Ladeleistung von  $P = 200 \text{ kW}$ . Übertragungsverluste werden nicht berücksichtigt.
- Für die Errichtungskosten der Energieversorgungsinfrastruktur  $\underline{w}$  wird angenommen, dass sie für alle Kandidaten identisch sind.

Die summierte Länge aller in der Verkehrswegeinfrastruktur modellierten Fahrstreifen beträgt 48.69 km. Es ergeben sich 9 996 Kandidaten, die jeweils für die Verortung einer Ladestelle mit 5 m Länge geeignet sind. Da die Aufenthaltsdauer der 18 134 betrachteten Fahrzeuge an diesen Kandidaten über die übertragbare Energiemenge entscheidet, ist eine Auswertung der individuellen Fahrzeugtrajektorien erforderlich, um die Koeffizienten der Matrix  $T$  zu ermitteln und somit die in Abschnitt 5.3 formulierten Nebenbedingungen des beschriebenen linearen Programms zu parametrieren. Abbildung 6.15 zeigt die räumliche Verteilung der über alle Fahrzeuge kumulierten Aufenthaltsdauern.

Das fertiggestellte Referenzszenario wird in einem nächsten Schritt (gemäß des in Kapitel 5 vorgestellten Verfahrens) für die Optimierung einer Energieversorgungsinfrastruktur verwendet. Als Optimierungsziel wird festgelegt, dass durch die Anordnung der Energieversorgungsinfrastruktur eine positive Energiebilanz sowohl für den kollektiven Verkehr, als auch für 50 % der individuellen Verkehrsmittel gewährleistet werden soll (vgl. Abschnitt 5.3.2.5). Darüber hinaus ist zu untersuchen, welchen Einfluss die Systemparameter der Energieversorgungsinfrastruktur auf das Ergebnis haben, insb. auf die Anzahl der erforderlichen Ladestellen.

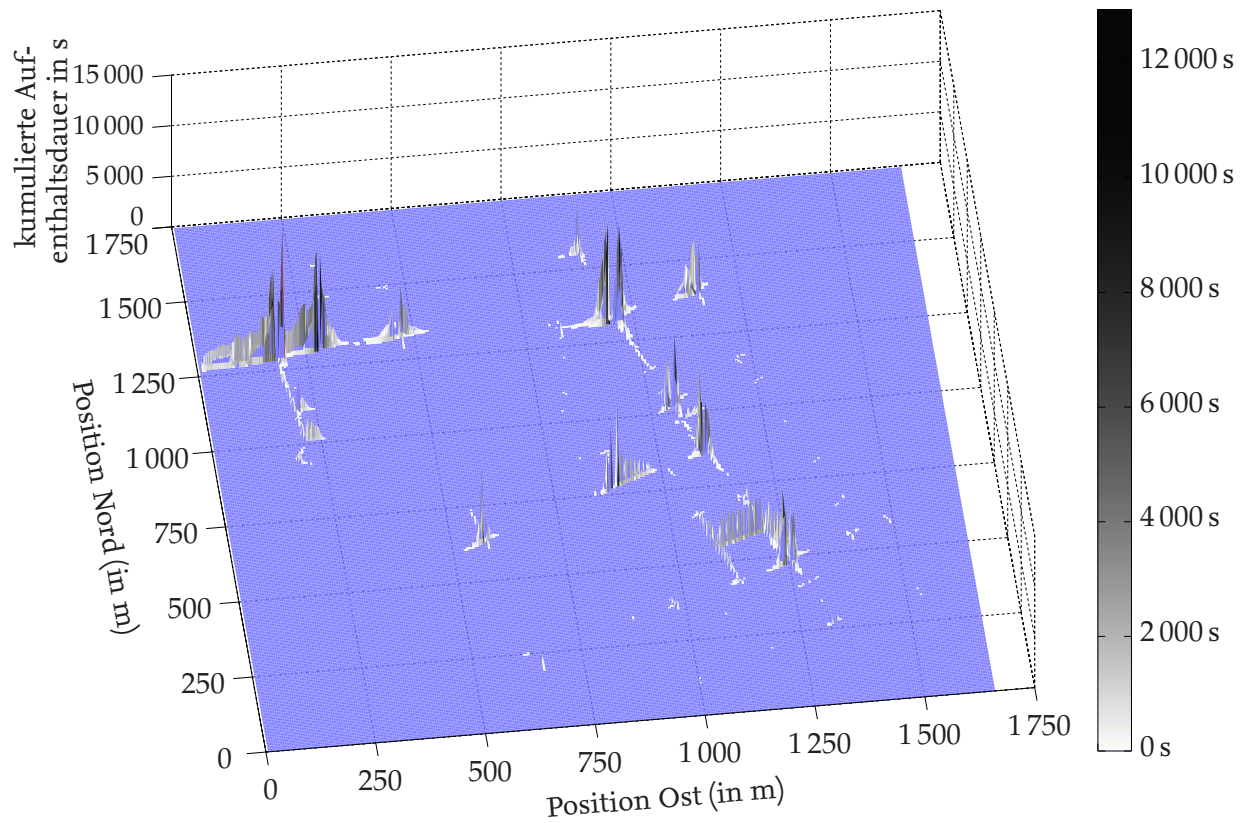


Abbildung 6.15.: Räumliche Verteilung der über alle Fahrzeuge kumulierten Aufenthaltsdauern, bei denen Fahrzeuge für mindestens fünf Sekunden stehen ( $v_{\text{Fzg}} = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  und  $T_s = 5 \text{ s}$ )

# 7 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Standortoptimierung beschrieben, mit der die induktiven Ladestellen einer Energieversorgungsinfrastruktur für das in Kapitel 6 entwickelte Referenzszenario angeordnet werden. In Abschnitt 7.1 werden die Ergebnisse der Standortoptimierung dargestellt und anschließend in Abschnitt 7.2 validiert. In Abschnitt 7.3 werden Empfehlungen für die Elektrifizierung des städtischen Straßenverkehrs und insb. den infrastrukturellen Ausbau gegeben. Das Kapitel wird mit einem Fazit in Abschnitt 7.4 abgeschlossen.

## 7.1. Ergebnisse der Standortoptimierung

Für die Optimierung der induktiven Ladestelleninfrastruktur wird in Unterabschnitt 5.3.2.5 ein lineares Programm vorgestellt, welches die ausreichende Energiezufuhr für den kollektiven Verkehr gewährleistet. Darüber hinaus wird im Unterabschnitt 5.3.2.6 vorgeschlagen, das entwickelte lineare Programm in eine feste Anzahl unterschiedlicher linearer Programme aufzuteilen (z. B. jeweils ein lineares Programm für Fahrzeuge mit geringem, mittlerem und hohem spezifischen Energiebedarf). Ziel dieser Unterteilung ist, Fahrzeuge mit hohem gegenüber denen mit geringem spezifischen Energiebedarf bei der Optimierung nicht zu benachteiligen. Bei den Ergebnissen der optimierten Ladestellenanordnung wird daher zwischen diesen zwei Fällen unterschieden: In Abschnitt 7.1.1 werden dazu die Ergebnisse der Ladestellenanordnung für den kollektiven Verkehr präsentiert, während sich in Abschnitt 7.1.2 der optimalen Ladestellenanordnung für die eingeführten Energiebedarfsklassen gewidmet wird. Abschließend folgt eine Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 7.1.3, in der die Variation der ermittelten Ladestellenanordnung hinsichtlich verschiedener Systemparameter untersucht wird.

### 7.1.1. Ladestellenoptimierung für den kollektiven Verkehr

Die Lösung des in Unterabschnitt 5.3.2.5 vorgestellten linearen Programms ergibt ein Optimum (minimale Kosten bei gegebenen Randbedingungen) von 104 Ladestellen, die im Untersuchungsraum platziert werden müssten. Im Rahmen der Optimierung werden Ladestellen erwartungsgemäß überwiegend vor lichtsignalgesteuerten Kreuzungen und vor Einmündungen auf höher priorisierte Straßen platziert. Die entsprechende Anordnung ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Mit einer summierten Länge von 520 m entspricht die Anzahl der Ladestellen einem Ausrüstungsgrad von 1.07 % der gesamten Verkehrswegeinfrastruktur.

Für die Auswertung der fahrzeugseitigen Konsequenzen dieser Infrastrukturanordnung werden in Abbildung 7.2 der absolute im Verhältnis zum spezifischen Energiebedarf aller im Referenzszenario betrachteten Fahrzeuge veranschaulicht. Erwartungsgemäß ist zu erkennen, dass mit zunehmender Fahrzeugmasse der spezifische Energiebedarf eines Fahrzeugs ansteigt. Die durch die Ladestellenanordnung erzielten Fahrzeugenergiebilanzen sowie das zugehörige Histogramm sind in den Abbildungen 7.3 und 7.4 dargestellt. Das Histogramm in Abbildung 7.4 verdeutlicht die Erfüllung der in Gleichung 5.14 formulierten Nebenbedingung, die besagt, dass mit

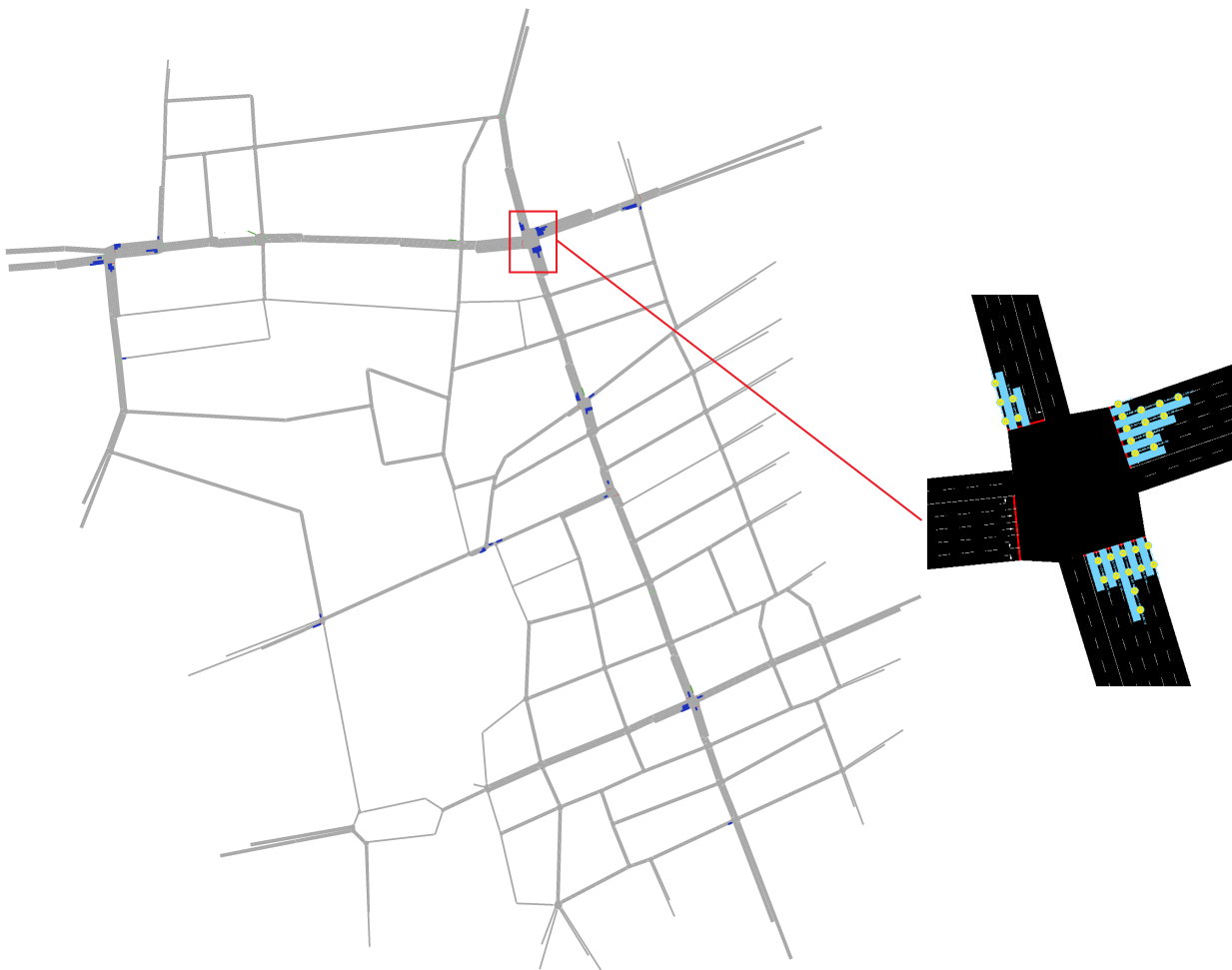


Abbildung 7.1.: Optimale Anordnung der Ladestellen im Untersuchungsraum (links) und ein Ausschnitt von der Forschungskreuzung Hagen-/Rebenring (rechts)

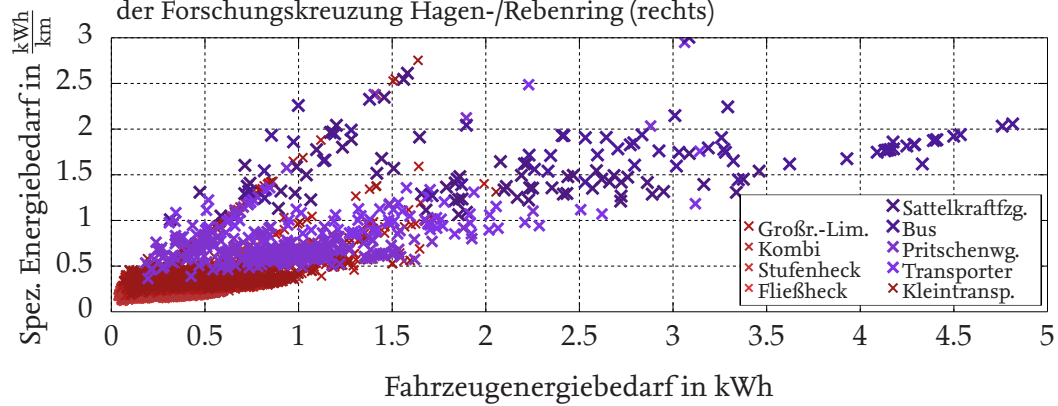


Abbildung 7.2.: Absoluter und spezifischer Energiebedarf aller im Referenzszenario betrachteten Fahrzeuge

der ermittelten Ladestellenanordnung eine positive Energiebilanz für 50 % der Fahrzeuge erzielt werden muss. Die Konsequenz dieser Nebenbedingung erschließt sich aus der durchschnittlichen Energiebilanz in Höhe von 0.594 kWh pro Fahrzeug. Um eine positive Energiebilanz für 50 % der Fahrzeuge zu gewährleisten, muss den Fahrzeugen in Summe fast das Dreifache ihres summierten Energiebedarfs zugeführt werden: In Summe stehen 17.16 MWh zugeführte Energie im Verhältnis zu 6.39 MWh erforderlicher Energie. Da die Halte- und Ladewahrscheinlichkeit an Ladestellen und somit auch die den Fahrzeugen durchschnittlich zugeführte Energiemenge nahezu unabhängig vom Fahrzeugtyp sind, liegt die durchschnittliche Energiebilanz bei Fahrzeugen mit geringem spezifischen Energiebedarf deutlich höher, als bei denen mit einem hohen spezifischen Energiebedarf.

Bei der zugeführten Energiemenge ist zu beachten, dass hierbei keine Sättigungen von Fahrzeugbatterien berücksichtigt werden und Fahrzeuge die zugeführte Energiemenge in Höhe von 17.16 MWh vollständig aufnehmen können. Im realen Verkehr wird es bei einigen dieser Fahrzeuge aufgrund einer vollständig geladenen Batterie zu einer vorzeitigen Beendigung des Ladevorgangs kommen. Ohne einer detaillierten Untersuchung der Ladezustandsverteilung in den betrachteten Fahrzeugen muss, für den unwahrscheinlichen Fall, dass keine Batteriesättigungen erreicht und die bereitgestellten Energiemengen vollständig abgenommen werden, eine Energiemenge in Höhe von 17.16 MWh als Reserve für den Verkehrsbetrieb vorgehalten werden. Der Erwartungswert der Energiemenge, die von Fahrzeugen an den Ladestellen tatsächlich abgenommen wird, liegt jedoch bei deren summiertem Energiebedarf in Höhe von 6.39 MWh.

In Abbildung 7.5 ist die Anzahl der erforderlichen Ladestellen in Abhängigkeit des geforderten Prozentsatzes von Verkehrsmitteln dargestellt, die jeweils eine positive Energiebilanz aufweisen sollen. Aus dem Verlauf der Kurve wird deutlich, dass mit 23 Ladestellen eine kollektiv positive Energiebilanz für den Verkehr gewährleistet werden kann, d.h. die summierte in Verkehrsmittel übertragene Energiemenge ist größer, als der summierte Energiebedarf aller Verkehrsmittel. Unberücksichtigt bleibt hierbei die Verteilung der zugeführten Energie über die Verkehrsmittel. Mit diesen ersten 23 Ladestellen kann jedoch bereits für ca. 11 % der individuell betrachteten Verkehrsmittel eine positive Energiebilanz gewährleistet werden. Mit dem in Abschnitt 5.3.2.6 eingeführten erforderlichen Anteil von Verkehrsmitteln, die eine positive Energiebilanz aufweisen sollen, steigt jedoch auch die Anzahl der erforderlichen Ladestellen. Im betrachteten Referenzszenario wird bei 450 Ladestellen der maximal mögliche Prozentsatz von Verkehrsmitteln in Höhe von 78 % erreicht. Es werden hierbei annähernd alle Kandidaten der Verkehrsweeinfrastuktur mit Ladestellen ausgerüstet, an denen Fahrzeuge halten. Der in dieser Arbeit geforderte Prozentsatz von 50 % begründet sich einerseits dadurch, dass dieser im städtischen Verkehr zu erreichen ist. Andererseits wird mit diesem Prozentsatz eine wirtschaftliche Abwägung geboten zwischen den Kosten für die Errichtung der Infrastruktur und dem Nutzen für Fahrzeuge.

Eine detaillierte Auflistung der Fahrzeugenergiebilanzen und weiterer wichtiger Kenndaten für die eingeführten Fahrzeugtypen findet sich in Tabelle 7.1. Die Histogramme der Fahrzeugenergiebilanzen für einzelne Fahrzeugtypen finden sich im Anhang unter Abschnitt D.1.

Tabelle 7.1.: Wichtige Kenndaten über den Energiebedarf und die Energiebilanz je Fahrzeugtyp nach Optimierung der Ladestellenanordnung für den kollektiven Verkehr

Fahrzeugtyp	mittl. spezif. Energiebedarf	mittlerer Energiebedarf	mittlere Energiebilanz	Anteil Fahrzge. mit pos. Energiebilanz
Fließheck-Limousine	0.207 $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	0.264 kWh	0.673 kWh	51.7 %
Stufenheck-Limousine	0.206 $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	0.265 kWh	0.696 kWh	52.2 %
Kombi-Limousine	0.229 $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	0.291 kWh	0.667 kWh	50.2 %
Großraum-Limousine	0.348 $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	0.451 kWh	0.483 kWh	49.4 %
Kleintransporter	0.389 $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	0.495 kWh	0.459 kWh	47.6 %
Transporter	0.712 $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	0.864 kWh	0.153 kWh	37.0 %
Pritschenwagen	1.065 $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	1.320 kWh	-0.448 kWh	26.7 %
Bus	1.805 $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	2.966 kWh	-2.184 kWh	10.2 %
Sattelkraftfahrzeug	1.566 $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	1.919 kWh	-0.852 kWh	24.3 %

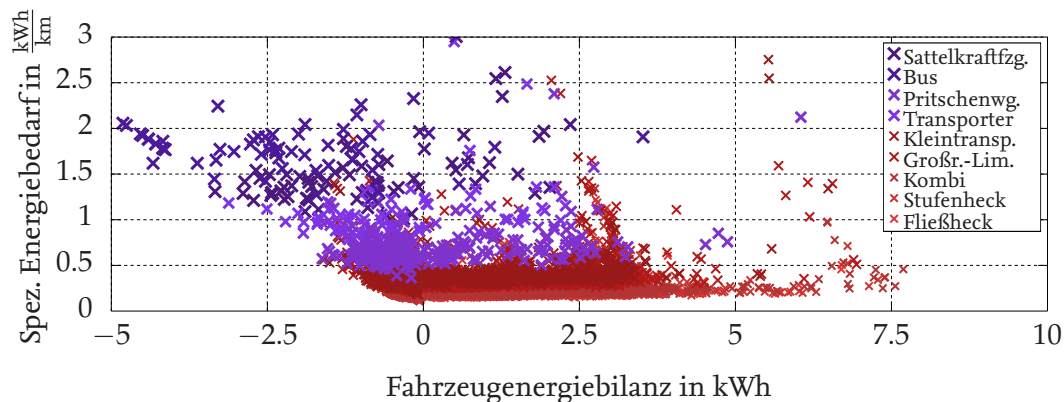


Abbildung 7.3.: Energiebilanz und spezifischer Energiebedarf aller im Referenzszenario betrachteten Fahrzeuge nach Optimierung der Ladestellenanordnung für den kollektiven Verkehr

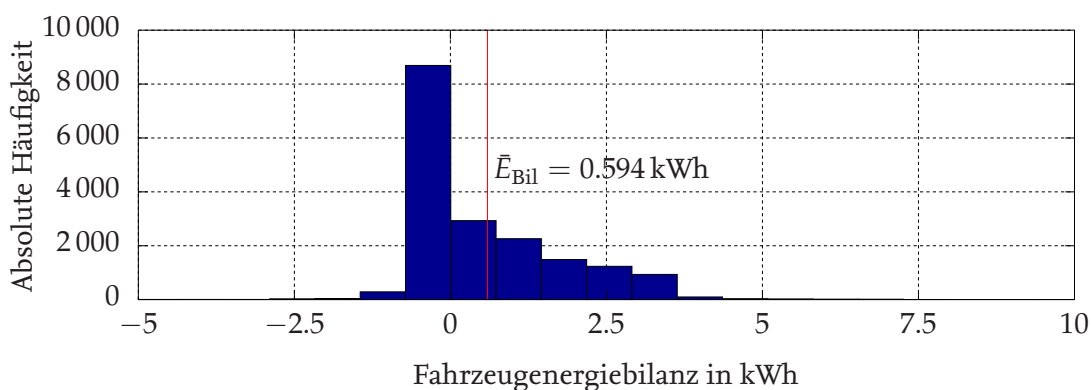


Abbildung 7.4.: Histogramm der Energiebilanzen aller Fahrzeuge nach Optimierung der Ladestellenanordnung für den kollektiven Verkehr



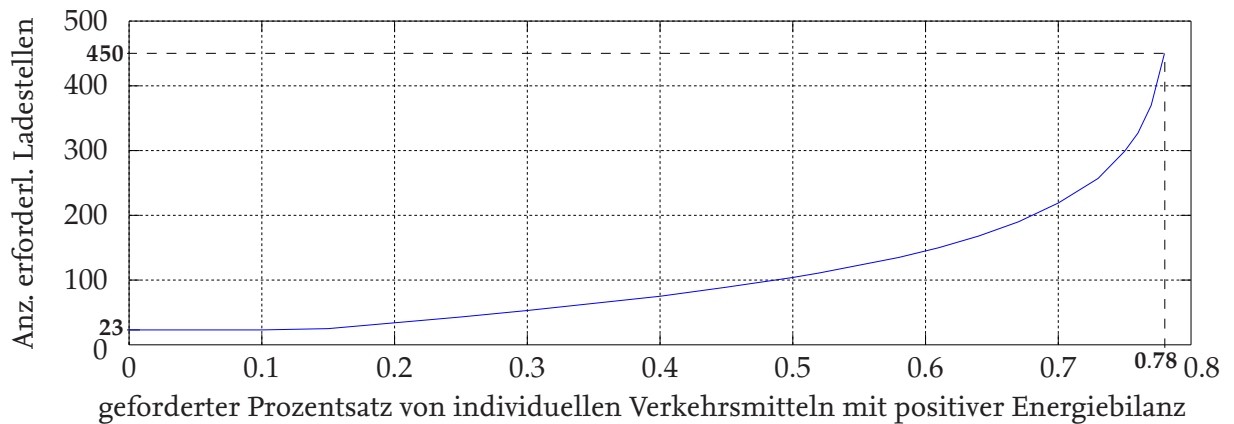


Abbildung 7.5.: Anzahl erforderlicher Ladestellen als Funktion des geforderten Prozentsatzes von individuellen Verkehrsmitteln mit positiver Energiebilanz

### 7.1.2. Ladestellenoptimierung nach Einführung spezifischer Energiebedarfsklassen

Um Verkehrsmitteln unabhängig ihres spezifischen Energiebedarfs durch die Ladestellenanordnung eine ausreichende Energieversorgung zu gewährleisten, werden entsprechend des in Unterabschnitt 5.3.2.6 vorgeschlagenen Ansatzes drei Energiebedarfsklassen eingeführt. Diese beinhalten jeweils Fahrzeuge mit einem *geringen* (Fahrzeugtypen: Fließheck-, Stufenheck- und Kombilimousine), *mittleren* (Fahrzeugtypen: Großraumlimousine, Kleintransporter und Transporter) oder *hohen* (Fahrzeugtypen: Pritschenwagen, Bus und Sattelkraftfahrzeug) spezifischen Energiebedarf.

Die drei linearen Programme ergeben eine vereinigte Anzahl von 177 Ladestellen. Diese setzen sich zusammen aus der vereinigten Menge von

- 101 Ladestellen, die für Fahrzeuge mit geringem,
- 106 Ladestellen, die für Fahrzeuge mit mittlerem und
- 80 Ladestellen, die für Fahrzeuge mit hohem

spezifischen Energiebedarf anzuordnen sind (siehe Abbildung 7.6). Jede Lösungsmenge gewährleistet eine positive Energiebilanz für die kollektiv betrachtete Energiebedarfsklasse sowie eine positive Energiebilanz für 50 % der jeweils darin berücksichtigten Fahrzeuge. Diese drei Lösungen repräsentieren jeweils die optimale Lösung für die in dem zugehörigen linearen Programm betrachteten Fahrzeuge, erlauben jedoch auch die Mitnutzung der angeordneten Ladestellen durch Fahrzeuge anderer Energiebedarfsklassen. Die Schnittmenge dieser drei Lösungen beinhaltet 20 Ladestellen. Die Lösungsmengen und ihre Schnittmengen untereinander sowie mit dem Ergebnis aus Abschnitt 7.1.1 sind in Abbildung 7.6 dargestellt. Mit einer summierten Länge von 885 m entspricht diese kombinierte Lösung einem Ausrüstungsgrad von 1,82 % der gesamten Verkehrswegeinfrastruktur. Die Verteilung der ermittelten Ladestellen im Untersuchungsraum ist in Abbildung 7.7 dargestellt. Der Vergleich zu dem Ergebnis für den kollektiven Verkehr zeigt erwartungsgemäß einen höheren Bedarf an Ladestellen und einen weiteren erforderlichen Ausbau der Energieversorgungsinfrastruktur. Es werden ca. 98 % der

Ladestellen vor lichtsignalgesteuerten Kreuzungsbereichen mit einer durchschnittlichen Länge von ca. 8.4 m pro Fahrstreifen platziert. Die Auswertung aller Kreuzungen und ihrer eingehenden Kanten im Untersuchungsraum zeigt jedoch, dass die genaue Anzahl erforderlicher Ladestellen von mehreren Faktoren abhängig ist, wie bspw. die Anzahl der Fahrzeuge deren Routen entlang einer betrachteten Kante führen oder die Abstimmung der Lichtsignalzeit- und -zustandspläne untereinander. Eine pauschale Aussage über die erforderliche Anzahl und Positionierung von Ladestellen vor einer Kreuzung ist nicht möglich, sondern erfordert eine detaillierte Analyse des vorherrschenden Verkehrsgeschehens in einem Untersuchungsraum.

Die geforderte positive Energiebilanz für 50 % der Fahrzeuge führt bei der Berücksichtigung der drei Energiebedarfsklassen zu einem deutlich höheren Verhältnis von zugeführter Energie zu tatsächlich benötigter Energiebedarf zur Folge. Es stehen 27.24 MWh an Energie, die für den Verkehrsbetrieb als Reserve vorgehalten werden muss, im Verhältnis zum (unveränderten) summierten Energiebedarf in Höhe von 6.39 MWh. Auch hier ist es unwahrscheinlich, dass beim Laden keine Sättigungen der Energiespeicher erreicht werden und die gesamte bereitgestellte Energiemenge in Höhe von 27.24 MWh in Fahrzeuge übertragen werden kann. Der Erwartungswert der Energiemenge, die von allen Fahrzeugen in dem Referenzszenario an den Ladestellen tatsächlich abgenommen wird, liegt weiterhin bei 6.39 MWh. Um eine zuverlässige Energieversorgung zu gewährleisten, muss jedoch mehr als das Vierfache des tatsächlichen Energiebedarfs als Reserve vorgehalten werden.

Der zeitliche Verlauf der Ladeleistung (ohne Berücksichtigung von Batteriesättigungen) ist in Abbildung 7.10 dargestellt und verdeutlicht, welche Herausforderung die vollständige Elektrifizierung des Straßenverkehrs für Energieversorger mit sich bringt. Im betrachteten Referenzszenario liegt der Leistungsbedarf bei durchschnittlich 10.89 MW. Der maximale Leistungsbedarf liegt bei 19.60 MW und entspricht einer Anzahl von 98 simultan geladenen Fahrzeugen.

Beim Fahrzeugtyp Bus zeigt sich nach Einführung der drei Energiebedarfsklassen eine deutliche Unterversorgung: Nur 37.3 % der Fahrzeuge durchqueren den Untersuchungsraum mit einer positiven Energiebilanz, deren Durchschnittswert bei  $-0.254 \text{ kWh}$  liegt. Ein Grund hierfür ist, dass die Fahrzeuge durch ihre Fahrzeugmasse einen durchschnittlich höheren spezifischen Energiebedarf haben als die Fahrzeugtypen Pritschenwagen und Sattelkraftfahrzeug, mit denen sich die Busse die Energiebedarfsklasse teilen. Die erhöhte Haltefrequenz der Fahrzeuge, die im Gegensatz zu den übrigen Fahrzeugen auf den erforderlichen Ein-, Aus- und Umstiegsbedarf von Fahrgästen zurückzuführen ist, trägt als weiterer Faktor zum hohen spezifischen Energiebedarf dieser Fahrzeuge bei. Da die Errichtung einer Energieversorgungsinfrastruktur mit dem eingeführten linearen Programm günstiger ist, wenn Fahrzeuge mit dem höchsten Energiebedarf eine negative Energiebilanz aufweisen, bleiben Busse in diesem Fall weiterhin systematisch benachteiligt. Die Einführung einer Energiebedarfsklasse für Fahrzeuge des ÖPNV erfordert (zusätzlich zu den ursprünglichen 177) 16 weitere Ladestellen, um bei 50 % der Busse eine positive Energiebilanz zu erzielen. Diese Ladestellen werden erwartungsgemäß überwiegend an Haltestellen platziert.

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass es für bestimmte Flotten durchaus geeigneter sein kann, deren Energieversorgung nicht in den Verkehrsbetrieb zu integrieren. In den Projekten *emil* und *InduktivLaden* zeigt sich am Beispiel des öffentlichen Verkehrsbetriebs in Braunschweig,

**Ergebnisse für kollektiven Verkehr**

(Zahlen und Pfeile kennzeichnen die Schnittmengen mit den kombinierten Ergebnissen für die eingeführten Energiebedarfsklassen)

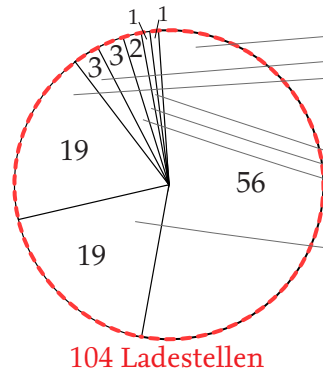
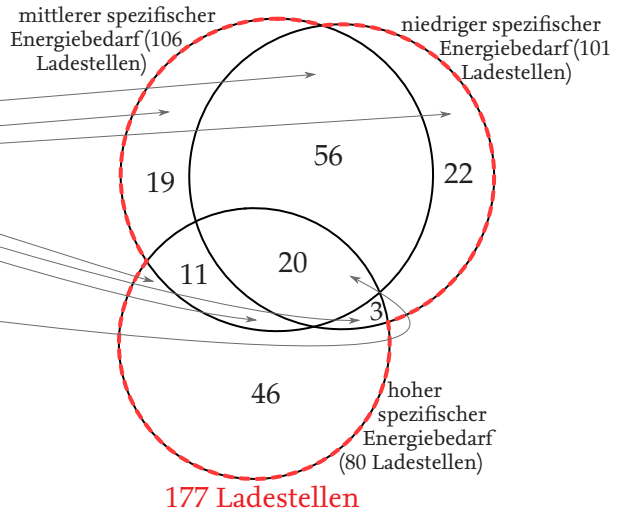
**Kombiniertes Ergebnis für die drei eingeführten Energiebedarfsklassen**

Abbildung 7.6.: Zusammensetzung der optimal angeordneten Ladestellen für den kollektiven Verkehr (links; Ergebnis aus Abschnitt 7.1.1.) und für die drei eingeführten Energiebedarfsklassen (rechts) mit Kennzeichnung der Schnittmengen

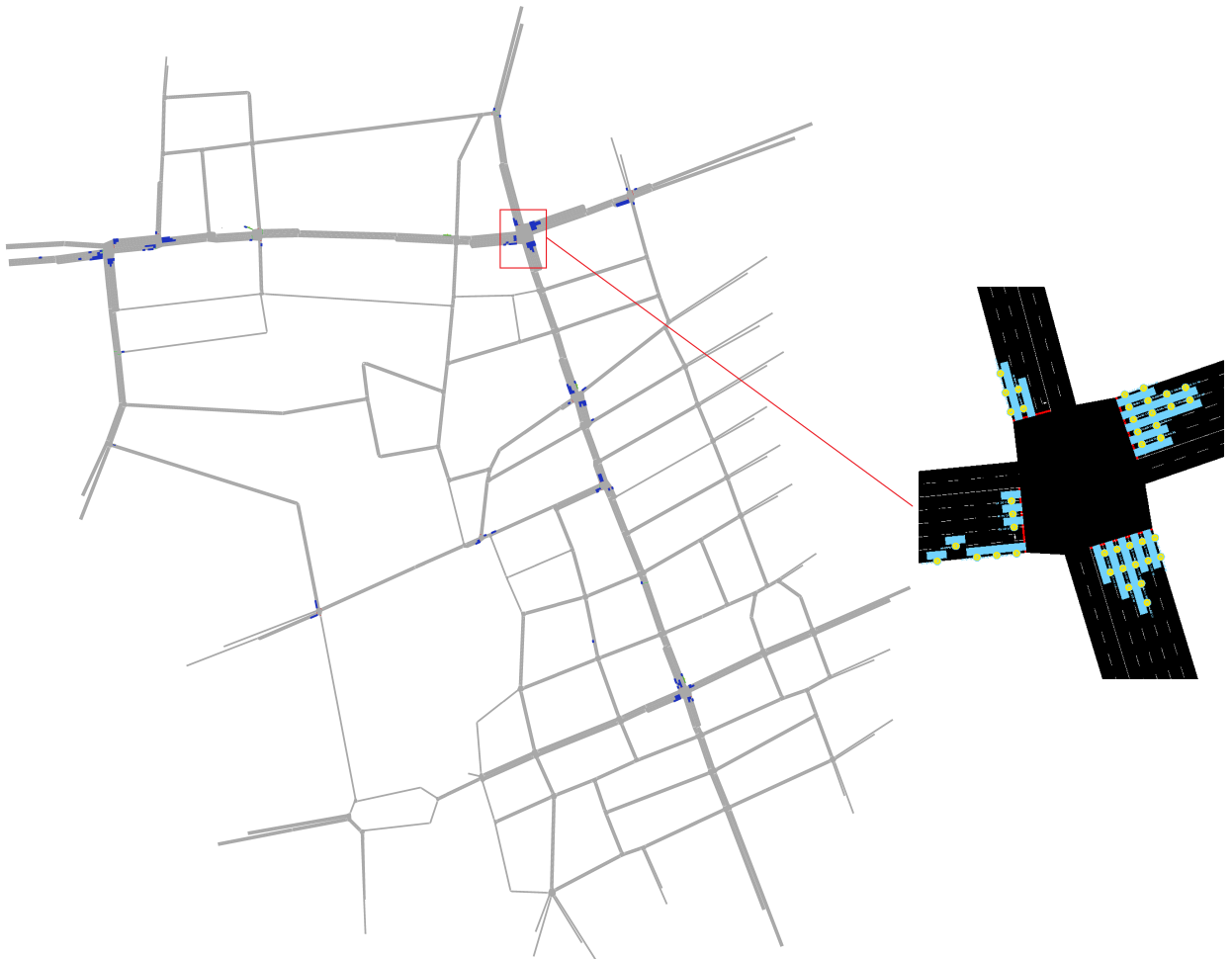


Abbildung 7.7.: Optimale Anordnung der Ladestellen im Untersuchungsraum (links) und ein Ausschnitt von der Forschungskreuzung Hagen-/Rebenring (rechts) unter Berücksichtigung der drei eingeführten Energiebedarfsklassen

Tabelle 7.2.: Wichtige Kenndaten über den Energiebedarf und die Energiebilanz je Fahrzeugtyp nach kombinierter Optimierung der Ladestellenanordnung für die drei eingeführten Energiebedarfsklassen

Fahrzeugtyp	mittl. spezif. Energiebedarf	mittlerer Energiebedarf	mittlere Energiebilanz	Anteil Fahrzge. mit pos. Energiebilanz
Fließheck-Limousine	0.207 $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	0.264 kWh	1.204 kWh	60.9 %
Stufenheck-Limousine	0.206 $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	0.265 kWh	1.248 kWh	61.5 %
Kombi-Limousine	0.229 $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	0.291 kWh	1.223 kWh	60.0 %
Großraum-Limousine	0.348 $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	0.451 kWh	1.036 kWh	59.5 %
Kleintransporter	0.389 $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	0.495 kWh	0.987 kWh	58.1 %
Transporter	0.712 $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	0.864 kWh	0.751 kWh	51.6 %
Pritschenwagen	1.065 $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	1.320 kWh	0.806 kWh	53.5 %
Bus	1.805 $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	2.966 kWh	−0.254 kWh	37.3 %
Sattelkraftfahrzeug	1.566 $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	1.919 kWh	0.351 kWh	43.2 %

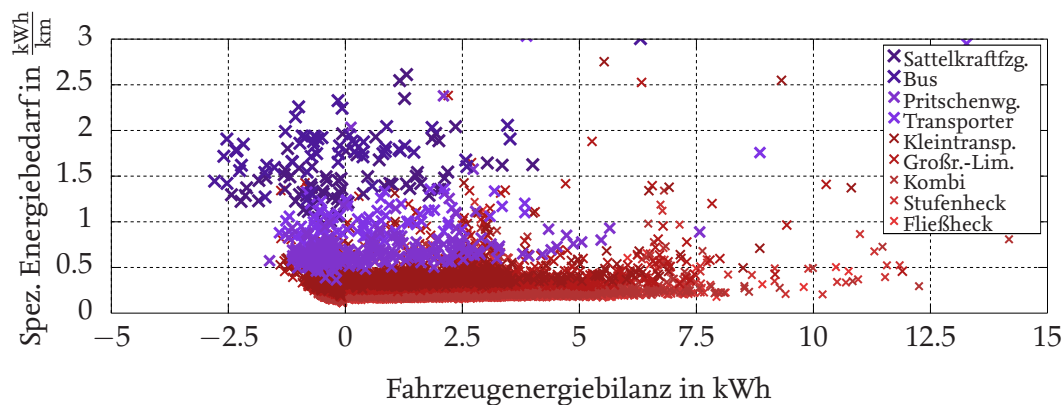


Abbildung 7.8.: Energiebilanz und spezif. Energiebedarf aller im Referenzszenario betrachteten Fahrzeuge nach kombinierter Optimierung der Ladestellenanordnung für die drei eingeführten Energiebedarfsklassen

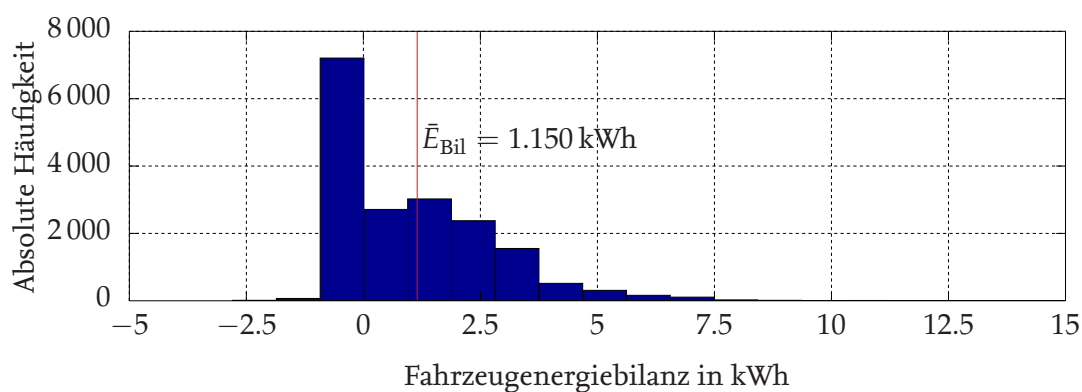


Abbildung 7.9.: Histogramm der Energiebilanzen aller Fahrzeuge nach kollektiver Optimierung der Ladestellenanordnung für die drei eingeführten Energiebedarfsklassen und Vereinigung der drei Ergebnismengen

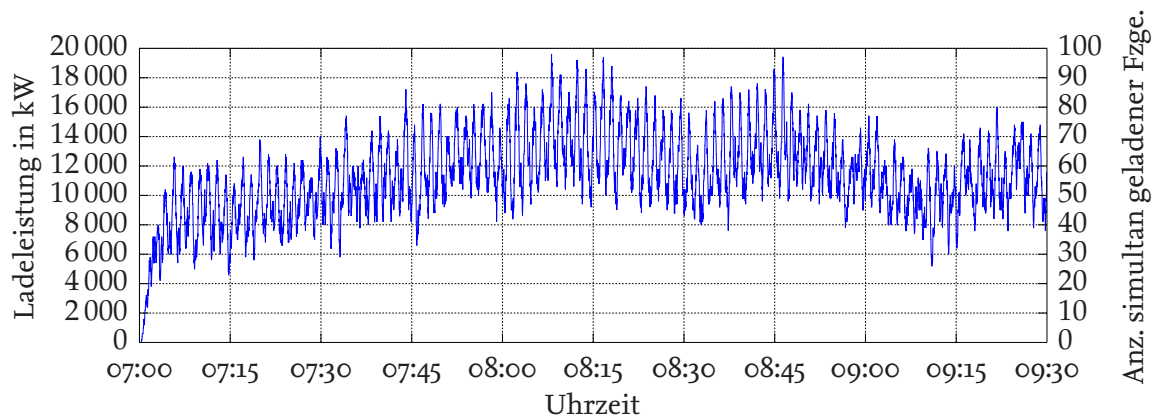


Abbildung 7.10.: Verlauf der im Untersuchungsraum summierten Ladeleistung über die Zeit

dass der Dauerbetrieb einer Buslinie mit deutlich weniger Ladestellen gewährleistet werden kann, wenn bspw. die Ruhezeiten der Fahrer für eine Energieübertragung genutzt werden. Dort wird eine gesamte Linie in 10-Minuten-Intervallen von sechs Bussen mit einer durchschnittlichen Umlaufdauer von 42 Minuten betrieben. Für die zuverlässige Versorgung der Fahrzeuge sind nur vier Ladestellen entlang des 11,7 km langen Linienwegs erforderlich. Dieser Ansatz ist besonders auf Fahrzeuge und Flotten mit wiederkehrenden Routen und fest definierbaren Standorten übertragbar, erfordert aber in jedem Fall eine detaillierte Auswertung des Nutzer- und Verkehrsverhaltens. Es kommen daher besonders die Flotten von Verkehrsbetrieben (inkl. Taxis), Kurier-, Express- und Paketdiensten sowie von städtischen Entsorgungsbetrieben in Betracht.

### 7.1.3. Sensitivitätsanalyse

Ausgehend von dem in Abschnitt 7.1.2 dargestellten Ergebnis der Ladestellenoptimierung nach Einführung spezifischer Energiebedarfsklassen wird in diesem Abschnitt eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dazu wird die erforderliche Anzahl von Ladestellen als Funktion von Systemparametern der Energieversorgungsinfrastruktur unter sonst gleichbleibenden Bedingungen untersucht. Im Rahmen dieser Sensitivitätsanalyse wird die Variation der

- Initialisierungsdauer  $T_s$ , die nach jedem individuellen Fahrzeughalt verstreicht, bevor eine Energieübertragung beginnt sowie der
- Ladeleistung  $P_{\text{laden}}$

betrachtet.

In Abbildung 7.11 ist der Verlauf der Anzahl von erforderlichen Ladestellen in Abhängigkeit der Initialisierungsdauer  $T_s$  dargestellt. Der Verlauf zeigt, dass die Initialisierungsdauer im Bereich von  $T_s = 1 \dots 9$  s keinen starken Einfluss auf die Anzahl erforderlicher Ladestellen hat und das Potenzial einer Reduzierung dieser Dauer somit nur sehr begrenzt ist.

Abbildung 7.12 zeigt den Verlauf der Anzahl erforderlicher Ladestellen in Abhängigkeit der Ladeleistung  $P_{\text{laden}}$ . Es wird deutlich, dass eine Steigerung der Ladeleistung ein weitaus größeres Potenzial bietet, um die Anzahl der Ladestellen zu reduzieren. Zu beachten sind hierbei jedoch die steigenden Anforderungen an

- die Leistungselektronik der Ladestationen, die auf das Zu- und Abschalten höherer Spannungen ausgelegt sein muss sowie

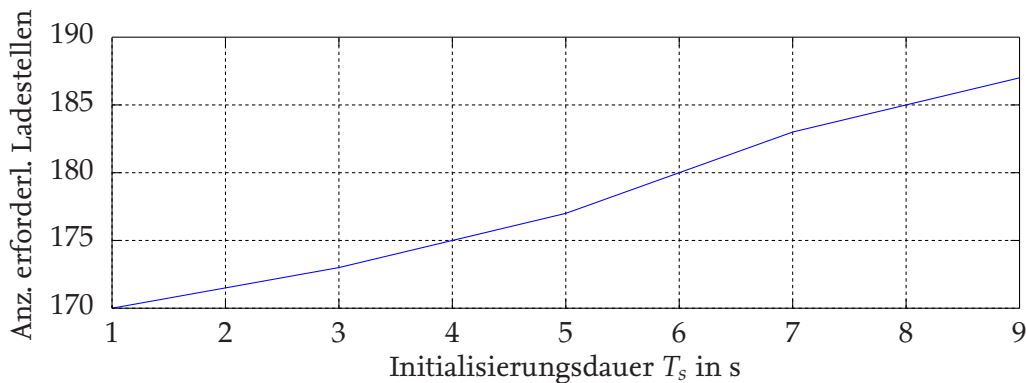


Abbildung 7.11.: Anzahl erforderlicher Ladestellen in Abhängigkeit der Initialisierungsdauer  $T_s$

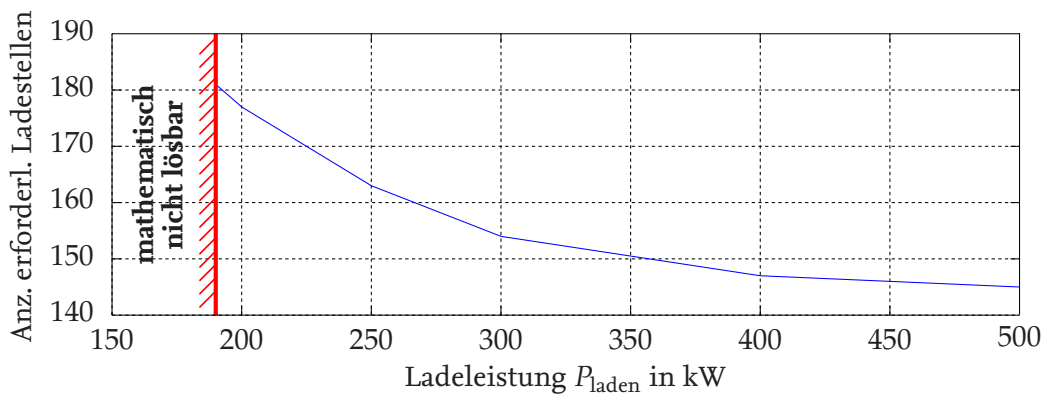


Abbildung 7.12.: Anzahl erforderlicher Ladestellen in Abhängigkeit der Ladeleistung  $P_{laden}$

- das elektrische Netz, welches somit auf größere Spannungsgradienten eingestellt sein muss.

## 7.2. Ergebnisvalidierung

Um die Optimalität der ermittelten Ladestellenanordnung zu validieren, wäre ein infrastruktureller Ausbau von Ladestellen an den ermittelten Positionen im realen Untersuchungsraum erforderlich. Darüber hinaus muss eine vollständige Erhebung des Verkehrsbetriebs im Untersuchungsraum erfolgen, die die Erfassung der Trajektorie und des Energiebedarfs von jedem Verkehrsmittel umfasst. Anschließend kann geprüft werden, ob mit der ermittelten Anordnung die geforderte Verteilung der Energiebilanzen in den Verkehrsmitteln erfüllt wird. Aufgrund des hohen Aufwands ist diese Validierung jedoch nicht realisierbar. Eine weitere Möglichkeit zur Validierung der ermittelten Ladestellenpositionen bietet sich durch die Analyse des Verkehrsbetriebs. Dazu muss die Trajektorie und der Energiebedarf von Fahrzeugen im realen Verkehr ermittelt werden. Mit diesen Messdaten und einem Verkehrsinfrastrukturmodell kann entsprechend des vorgestellten Verfahrens ein weiteres lineares Programm für die Optimierung entwickelt werden, um die optimalen Ladestellenpositionen für den realen Verkehr zu bestimmen. Zu beachten ist hierbei, dass die betrachteten Trajektorien das Verkehrsverhalten repräsentativ widerspiegeln. Hierzu zählen die gewählten Routen und die Betrachtungszeiträume sowie auch der Stichprobenumfang. Anschließend können die Ladestellenpositionen, die zuvor auf Basis einer Verkehrssimulation ermittelt wurden, mit denen verglichen werden, die aus den Betriebsdaten des realen Verkehrs



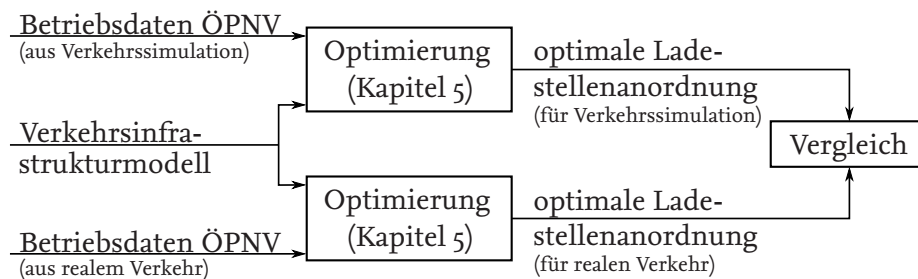


Abbildung 7.13.: Vorgehen bei der Validierung von ermittelten Ladestellenpositionen

resultieren. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 7.13 dargestellt. Bei diesem Vorgehen stellt sich die Herausforderung, dass die vollständige Erfassung aller Betriebsdaten des realen Verkehrs in einem Untersuchungsraum ebenfalls nur schwer realisierbar ist.

Zur Validierung der ermittelten Ladestellenstandorte muss in vielen Fällen auf stichprobenartige Erhebungen zurückgegriffen werden. Für das betrachtete Szenario können die Messdaten der elektrischen Linienbusse aus den Projekten *emil* und *InduktivLaden* herangezogen werden, die während des gesamten Linienbetriebs erfasst werden und sowohl die Trajektorie als auch den Energiebedarf von Fahrzeugen umfassen. Diese Messdaten werden anschließend ausgewertet, um mit dem vorgestellten Optimierungsverfahren die optimalen Ladestellenstandorte zu ermitteln. Dabei werden nur die Abschnitte der Fahrzeugtrajektorien berücksichtigt, die sich im definierten Untersuchungsraum befinden. Anschließend wird validiert, ob mit den aus der Verkehrssimulation ermittelten Ladestellenstandorten die geforderte Verteilung der Fahrzeugenergiebilanzen (positive Energiebilanz sowohl für das Kollektiv als auch für 50 %) im realen Verkehr eingehalten werden kann.

Die Auswertung von 645 dieser ÖPNV-Trajektorien aus dem *realen Verkehr* ergibt eine Lösungsmenge von 15 Ladestellen (an 8 Standorten) entlang des Linienwegs, um sowohl für das Kollektiv als auch für 50 % der einzeln betrachteten Busse eine positive Energiebilanz zu erzielen. Die Auswertung der ÖPNV-Trajektorien (mit den gleichen Fahrzeugrouten, die im realen Verkehr betrachtet wurden) aus der *Verkehrssimulation* ergibt eine Lösungsmenge von 12 Ladestellen (an 9 Standorten). Ein Vergleich der zwei Lösungsmengen ergibt eine Schnittmenge von 8 Ladestellen (an 6 Standorten). Durch Positionierung von Ladestellen an den mit der Verkehrssimulation ermittelten Standorten ergibt sich das in Abbildung 7.14 dargestellte Histogramm der Fahrzeugenergiebilanzen im realen Verkehr.

Es zeigt sich, dass nur 31 % der Fahrzeuge eine positive Energiebilanz aufweisen, die im Mittel bei  $-0.763 \text{ kWh}$  liegt. Es wird deutlich, dass die geforderten Optimierungskriterien der Energiebilanzen nicht erfüllt werden. Dies ist auf drei Hauptursachen zurückzuführen:

1. Die mit einem GPS-Empfänger gemessenen Fahrzeugpositionen weisen z.T. hohe Streuungen auf. Deshalb wurden einerseits nur Fahrzeuglängspositionen auf den Kanten des Straßennetzes berücksichtigt, andererseits repräsentieren die Messwerte aufgrund der Streuung nicht immer den tatsächlichen Haltepunkt von Fahrzeugen.
2. Während des Messzeitraums befand sich eine Baustelle auf der Strecke, die einen großen Einfluss auf den Verkehr hatte. Diese Baustelle wurde in dem Referenzszenario nicht berücksichtigt.

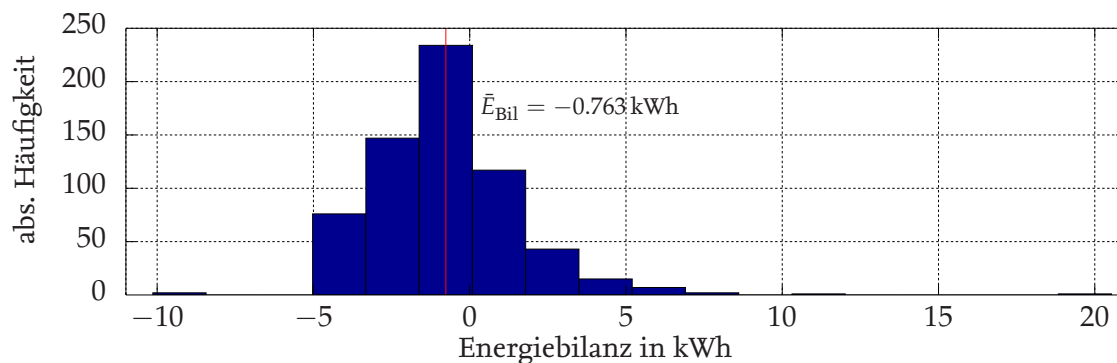


Abbildung 7.14.: Validierung: Histogramm der Energiebilanzen für ÖPNV-Fahrzeuge im realen Verkehr mit Ladestellen an den mittels Verkehrssimulationen ermittelten Standorten

3. Das mikroskopische Fahrzeugfolgemodell ist nur eine Näherung des Verhaltens realer Fahrer.

## 7.3. Migration

Während der Optimierung wurden 177 Ladestellen ermittelt, die im Untersuchungsraum platziert werden müssen, um den Verkehr mit ausreichend Energie zu versorgen. Es wurde dabei eine vollständige Kompatibilität aller Verkehrsmittel mit der zu errichtenden Energieversorgungsinfrastruktur vorausgesetzt. Wird die Inbetriebnahme einer entsprechenden Ladestelleninfrastruktur angestrebt, ergeben sich im nächsten Schritt Herausforderungen bei deren Integration in das Verkehrssystem. Einerseits kann der Infrastrukturausbau enorme Investitionskosten mit sich bringen. Andererseits erfordert dieser die temporäre Sperrung von Verkehrswegen, die während der Baumaßnahmen nicht genutzt werden können und bei einer gleichzeitigen Inbetriebnahme aller Ladestellen enorme Beeinträchtigungen des Verkehrs zur Folge hätten. Darüber hinaus muss der Ausbau der Energieversorgungsinfrastruktur mit einem Ausbau des Energienetzes begleitet werden. Die Platzierung von Ladestellen muss folglich sukzessiv erfolgen. Es wird in diesem Abschnitt eine Strategie vorgestellt, um eine etappenweise Durchführung dieser Migration zu ermöglichen.

Ausgehend vom derzeitigen Verkehr, der sich durch einen sehr geringen Anteil von Verkehrsmitteln mit alternativen Antriebs- und Versorgungskonzepten kennzeichnet, wird in Anlehnung an [Barak, 2013; Obrenovic, 2009] eine infrastrukturseitige Migrationsstrategie für alternative Energieversorgungsinfrastrukturen empfohlen, die sich in die folgenden fünf Phasen gliedert:

- 1. Zielgruppenanalyse:** Zu Beginn muss die Zielgruppe einer einzurichtenden Energieversorgungsinfrastruktur identifiziert und analysiert werden. Hierzu gehört insb. die Ermittlung der Anzahl von Verkehrsmitteln, die für eine Nutzung dieser in Frage kommen und eine Untersuchung ihres Verkehrs- und Fahrverhaltens. Es wird ein Untersuchungsraum definiert, in welchem eine Energieversorgungsinfrastruktur den Energiebedarf eines möglichst großen Fahrzeuganteils abdecken soll. Anschließend wird der Verkehr im Untersuchungsraum modelliert, kalibriert und die Simulationsergebnisse ausgewertet. Sind Fahrzeugtrajektorien aus dem Untersuchungsraum verfügbar, können diese als Grundlage für eine Ladestellenoptimierung und als Validierung der über die Verkehrssimulation ermittelten Ladestellenanordnung genutzt werden. Es ist auf einen

großen und repräsentativen Stichprobenumfang zu achten. Zuletzt muss mithilfe der Simulation geprüft werden, ob die Optimierungsziele (z. B. positive Energiebilanz für 50 % der Verkehrsmittel je Energiebedarfsklasse) plausibel und erreichbar sind.

- 2. Marktanlauf:** Erste Ladestellen sind an zentralen Knotenpunkten mit einer hohen Verkehrsstärke bzw. mit hohen Haltedauern zu platzieren, so dass mit ihnen die in Verkehrsmittel übertragene Energiemenge zunächst maximiert wird. Für das betrachtete Referenzszenario zeigt sich, dass die fünf hierfür geeignetsten induktiven Ladestellen (jeweils mit einer Länge von 5 m) mit einer summierten durchschnittlichen Ladeleistung von 600 kW Energie in Verkehrsmittel übertragen und somit fast ein Viertel des Energiebedarfs im Untersuchungsraum abdecken.
- 3. Markthochlauf:** Nächstes Ziel beim Ausbau der Energieversorgungsinfrastruktur ist, dass durch ihre Anordnung den Verkehrsteilnehmern der Zielgruppe mindestens so viel Energie bereitgestellt wird, wie diese in Summe benötigen. Für das betrachtete Referenzszenario erfordert dies eine Anzahl von 23 Ladestellen, jeweils mit einer Länge von 5 m.
- 4. Sättigung:** Die Verortung der verbleibenden Komponenten muss eine verlässliche Energieversorgung und eine homogene Verteilung der Energiebilanzen in Verkehrsmitteln verschiedener Fahrzeugtypen gewährleisten, so dass die in Phase 1 definierten Optimierungsziele erreicht werden (z. B. positive Energiebilanz für 50 % der Verkehrsmittel je Bedarfsklasse). Für das betrachtete Referenzszenario wäre die sukzessive Inbetriebnahme von 154 weiteren Ladestellen erforderlich.
- 5. Anpassung:** Um auf Änderungen in der Verkehrsnachfrage und/oder im Nutzerverhalten zu reagieren und eine Anpassung der Ladestellenanordnung entsprechend vornehmen zu können, ist in regelmäßigen Abständen eine Bedarfsanalyse des Untersuchungsraums erforderlich.

In Anbetracht derzeitiger Entwicklungen im Bereich der Antriebs-, Speicher- und Übertragungstechnologien ist davon auszugehen, dass künftig eine Vielfalt von Versorgungskonzepten den Straßenverkehr mit Energie versorgen wird. Im Laufe der kommenden Jahrzehnte wird voraussichtlich keines dieser Versorgungskonzepte eine derart dominante Position einnehmen, die mit heutigen Tankstellen vergleichbar ist. Das vorgestellte Verfahren für die Ermittlung optimaler Ladestellenstandorte kann jedoch auch Anwendung finden, wenn nur Teilmengen des Verkehrs betrachtet und von der zu errichtenden Infrastruktur versorgt werden sollen. Gesetzt den Fall, dass die Kompatibilität der Verkehrsmittel mit der zu errichtenden Infrastruktur stochastisch unabhängig vom Fahrzeugtyp ist und sich ihr Verhalten (inkl. Route) nicht von dem der übrigen Verkehrsmittel unterscheidet, gewährleistet das Ergebnis für den gesamten Verkehr (Grundgesamtheit) bereits Optimalität für jede beliebige zu betrachtende Untermenge (Stichprobe). Ist dies nicht der Fall, müssen die hier vorgestellte Analyse und Optimierung explizit für die zu betrachtende Untermenge bzw. Fahrzeugflotte durchgeführt werden. Während die Optimalität einer Ladestellenanordnung unabhängig vom Prozentsatz zu versorgender Verkehrsmittel ist, steht die bereitzustellende Energiemenge in proportionalem Zusammenhang zu der Anzahl von Verkehrsmitteln, die von der Energieversorgungsinfrastruktur versorgt werden sollen.

## 7.4. Fazit

Es wird in dieser Arbeit ein städtisches Referenzszenario betrachtet, dessen Verkehrsweeinfrastuktur sich aus einer summierten Fahrstreifenlänge von 48.69 km zusammensetzt. Die 18 134 darin betrachteten Verkehrsmittel legen im Laufe der Simulationsdauer von 2.5 h eine Strecke von 23 756 km zurück und der Energiebedarf liegt bei 6.39 MWh. Es sind 23 Ladestellen erforderlich (entspricht 0.23 % der Verkehrsweeinfrastuktur), um dem Verkehr mindestens so viel Energie zuzuführen, wie benötigt wird. Wird zusätzlich eine positive Energiebilanz für 50 % der einzeln betrachteten Verkehrsmittel gefordert, erhöht sich die Anzahl der notwendigen Ladestellen auf 104 (entspricht 1.07 % der Verkehrsweeinfrastuktur). Soll diese Forderung darüber hinaus für drei Energiebedarfsklassen (Fahrzeuge mit hohem, mittlerem und geringem spezifischen Energiebedarf) erfüllt werden, steigt die Anzahl der erforderlichen Ladestellen auf 177 (entspricht 1.82 % der Verkehrsweeinfrastuktur). Ohne Berücksichtigung von Batteriesättigungen wird das Fahrzeugkollektiv mit einer durchschnittlichen Leistung von 10.89 MW (bei einem Spitzenwert von 19.60 MW) geladen. Die in die Fahrzeuge übertragene Energiemenge liegt über dem Vierfachen des tatsächlichen Energiebedarfs. Unter Berücksichtigung der Batteriesättigungen reduziert sich die in die Fahrzeuge übertragene Energiemenge auf den tatsächlichen Energiebedarf in Höhe von 6.39 MWh. Hierdurch sinkt auch die durchschnittliche Ladeleistung auf 2.55 MW.

Wird die Markteinführung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten durch einen strategisch und betrieblich optimierten Ausbau einer zugehörigen, standardisierten Energieversorgungsinfrastruktur motiviert, ergeben sich viele Vorteile für den resultierenden Verkehrsbetrieb in Großstädten. Dadurch, dass die Prozesse der Energieübertragung in den Verkehrsbetrieb integriert werden, müssen Fahrzeuge weder Umwege für ihre Energieversorgung vornehmen noch Aufenthalte an den Versorgungseinrichtungen für die Energieübertragung einplanen.

Wird das vorgestellte Optimierungsverfahren segmentweise auf eine gesamte Stadt oder einen Ballungsraum übertragen, zeigt sich darüber hinaus, dass der Verkehrsbetrieb auch mit deutlich kleineren Fahrzeugenergiespeichern bzw. Restreichweiten gewährleistet werden kann, als sie in konventionellen Fahrzeugen üblich sind bzw. in Elektrofahrzeugen angestrebt werden. Fahrzeuge werden über räumlich verteilte Komponenten einer Versorgungsinfrastruktur zuverlässig mit der erforderlichen Energie versorgt. Durchquert ein Verkehrsmittel entlang seiner Route mehrere Untersuchungsräume, ist mit den hier gewählten Annahmen in jedem dieser Untersuchungsräume die Wahrscheinlichkeit einer positiven Energiebilanz  $> 0.5$ . Durch die durchschnittliche Überversorgung (im vorgestellten Referenzszenario in Höhe von 1.150 kWh) wird im betrachteten Untersuchungsraum sogar eine Aufladung der Batterie während des Betriebs ermöglicht. Zu einem gewissen Umfang könnte so auch der Verkehrsbetrieb in den peripheren Bereichen einer Stadt oder eines Ballungsraums mitversorgt werden, in denen die Versorgungsinfrastruktur nicht im erforderlichen Umfang ausgebaut ist.

# 8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur optimalen Anordnung von Komponenten einer Energieversorgungsinfrastruktur im Straßenverkehr vorgestellt, um die auf lange Sicht bevorstehende Abkehr von fossilen Energieträgern mit gezielten infrastrukturellen Optimierungsmaßnahmen begleiten zu können. In Abschnitt 8.1 werden die einzelnen Schritte des entwickelten Verfahrens zusammengefasst, bevor die Arbeit in Abschnitt 8.2 mit möglichen Anknüpfungspunkten für zukünftige Arbeiten abgeschlossen wird.

## 8.1. Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Optimierung der elektrisch-induktiven Ladeinfrastrukturanordnung für den städtischen Straßenverkehr. Für die optimale Anordnung der Ladestellen sind detaillierte Kenntnisse über die zu versorgenden Verkehrsmittel und deren Betrieb erforderlich, der mit Verkehrssimulationen nachgebildet wird. Die der Verkehrssimulation zugrundeliegenden Modelle werden anhand eines iterativen Vorgehens kalibriert, wodurch sich repräsentative Verkehrsszenarien ergeben, die das Verhalten einzelner Verkehrsmittel und den Verkehrsbetrieb widerspiegeln. Damit die Optimierung eine ausreichende Energieversorgung gewährleisten kann, wird der Energiebedarf einzelner Verkehrsmittel während ihrer Simulation ermittelt. Anschließend berechnet ein Optimierungsmodell Ladestellenpositionen, so dass Verkehrsmitteln eine ausreichende Energiemenge bereitgestellt werden kann.

Zunächst werden in Kapitel 2 die Anforderungen an die Modellstruktur formuliert. Um Energieübertragungsprozesse in realen Untersuchungsräumen auf Grundlage von Verkehrssimulationen zu untersuchen, ist eine hohe Genauigkeit bei der Positionierung von Fahrzeugen auf induktiven Ladestellen erforderlich. Es ist deshalb eine mikroskopische Modellstruktur für die Simulation des Verkehrs notwendig. Es werden eine Analyse bestehender Verkehrssimulationswerkzeuge durchgeführt und nach der Identifikation von Defiziten die notwendigen Erweiterungen in SUMO konzeptioniert, mit denen die Berechnung des Energiebedarfs von Elektrofahrzeugen und die Simulation von Energieübertragungsprozessen ermöglicht werden. Anschließend werden die verwendeten Modelle zur Beschreibung des Fahrzeug- und Verkehrsverhaltens sowie der Verkehrsinfrastruktur und -nachfrage vorgestellt.

Für die realitätsgetreue Nachbildung des Verkehrs werden in Kapitel 3 Methoden zur Kalibrierung und Validierung der Verkehrsszenarien zusammengefasst. Es werden anschließend Anforderungen an die Kalibrierung sowie Validierung der Szenarien formuliert, um die folgende Analyse der Energieübertragungsprozesse sowie die Optimierung der Ladestellenanordnung durchführen zu können. Der Fokus liegt einerseits auf der makroskopischen Validität des Verkehrsszenarios, um vorherrschende Verkehrsstärken realitätsgetreu in der Simulation nachzubilden. Diese entscheidet



über die Anzahl von Verkehrsmitteln, welche für die Nutzung von Ladeeinrichtungen potenziell in Frage kommen, weil diese auf ihren Routen liegen. Bei der Routenwahl wird daher eine größtmögliche Konsistenz mit gemessenen Verkehrsstärken gefordert. Andererseits entscheidet die mikroskopische Modellvalidität über die Haltedauer von Fahrzeugen an Ladestellen und somit über die potenziell übertragbare Energiemenge. Die Haltedauer muss folglich durch eine Parametrierung des mikroskopischen Fahrzeugfolgmodells optimiert werden.

In Kapitel 4 wird ein diskretes Energiemodell vorgestellt, weil die optimierte Anordnung einer Energieversorgungsinfrastruktur präzise Kenntnis über die benötigte Energiemenge jedes individuellen Verkehrsmittels erfordert. Es werden die erforderlichen kinematischen und dynamischen Zusammenhänge und Strukturen vorgestellt, die nach einer Parametrierung für die valide Nachbildung des Fahrzeugenergiebedarfs in mikroskopischen Verkehrssimulationen genutzt werden können.

In Kapitel 5 wird ein Überblick über bestehende Ansätze für die Standortoptimierung von Komponenten einer Energieversorgungsinfrastruktur geboten. Unter Kenntnis von Fahrzeugtrajektorien und des Energiebedarfs individueller Verkehrsmittel wird anschließend ein lineares Programm entwickelt, welches die optimierte Anordnung von Ladestellen in städtischen Verkehrsinfrastrukturen und die gleichzeitige Integration von Energieübertragungsprozessen in den Verkehrsbetrieb erlaubt. Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Errichtungskosten für die Versorgungsinfrastruktur. Dabei soll ein geforderter Prozentsatz der betrachteten Verkehrsmittel eine positive Energiebilanz aufweisen, indem ihnen eine Mindestenergiemenge in Höhe ihres individuellen Energiebedarfs zugeführt wird. Hierfür kommt die Big-M-Methode zur Anwendung. Um Fahrzeuge mit hohem gegenüber denen mit geringem spezifischen Energiebedarf nicht zu benachteiligen, werden darüber hinaus verschiedene Energiebedarfsklassen eingeführt, für die jeweils die vorgestellte Optimierung durchgeführt wird.

In Kapitel 6 wird die Modellierung eines Referenzszenarios in einem städtischen Untersuchungsraum mit allen relevanten Konstituenten beschrieben. Mit diesem Referenzszenario wird anschließend das vorgestellte Optimierungsverfahren durchgeführt. Um mikroskopische und makroskopische Kenngrößen in der erweiterten Simulation mit SUMO repräsentativ nachzubilden, wird das Vorgehen bei der Modellkalibrierung vorgestellt. Beim resultierenden Verkehrsszenario wird angenommen, dass der Verkehr vollständig über die zu optimierende Energieversorgungsinfrastruktur versorgt wird.

In Kapitel 7 werden anschließend die Ergebnisse der Optimierung vorgestellt. Es wird gezeigt, dass die Forderung nach einer zuverlässigen Energieversorgung mit einer energetischen Überversorgung einzelner Verkehrsmittel einhergeht. Dazu werden zwei Optimierungskriterien untersucht: Einerseits wird in Abschnitt 7.1.1 die zuverlässige Energieversorgung des kollektiven Verkehrs und anschließend in Abschnitt 7.1.2 die zuverlässige Energieversorgung von jeweils drei Energiebedarfsklassen (geringer, mittlerer und hoher spezifischer Energiebedarf) untersucht. Wird die Sättigung von Energiespeichern nicht betrachtet, wird im Referenzszenario für die Kompensation des summierten Energiebedarfs in Höhe von 6.39 MWh eine zugeführte Energiemenge von 17.16 MWh (für den kollektiven Verkehr) bzw. von 27.24 MWh (für die drei eingeführten Energiebedarfsklassen) gefordert. Hierfür müssen 1.07 % bzw. 1.82 % der Verkehrswegeinfrastruktur mit Ladestationen ausgerüstet sein, die mit einer durchschnittlichen summierten Ladeleistung von 6.86 MW bzw. 10.89 MW Energie in die Verkehrsmittel übertragen.



Die Energieübertragung erfolgt überwiegend im Rückstau vor rotzeigenden Lichtsignalanlagen, für die die zu versorgenden Verkehrsmittel keine Umwege vornehmen oder zusätzlichen Halte einplanen müssen.

Für eine softwareseitige Unterstützung entlang des eingesetzten Verfahrens wird im Rahmen dieser Arbeit das MATLAB-basierte Softwarewerkzeug eNetEditor vorgestellt. Es eignet sich insbesondere für die grafisch assistierte Erstellung von Verkehrsszenarien (bestehend aus Verkehrsinfrastruktur, Verkehrsmittel und Verkehrsnachfrage) sowie für deren Kalibrierung. Diese Szenarien können anschließend im erweiterten mikroskopischen Verkehrssimulationswerkzeug SUMO simuliert werden. Darüber hinaus werden mit eNetEditor die in dieser Arbeit vorgestellten Methoden der energetischen Analyse des Stadtverkehrs sowie der Optimierung der Energieversorgungsinfrastruktur für ähnliche bzw. aufbauende Arbeiten nachhaltig nutzbar gemacht.

## 8.2. Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Ladestellenstandorte sind optimal für das entwickelte Referenzszenario. Durch Modellierung und Untersuchung weiterer Szenarien ist zu prüfen, inwiefern die Ergebnisse dieser Arbeit (bezogen bspw. auf die summierte Länge der Verkehrsweginfrastuktur, Anzahl der betrachteten Verkehrsmittel oder auf den erforderlichen Fahrzeuganteil mit positiver Energiebilanz) auf den städtischen Straßenverkehr allgemein übertragen werden können.

Das Verhalten von Verkehrsmitteln wird in dieser Arbeit mit mikroskopischen Modellen nachgebildet. Durch die vereinfachten Annahmen der Verhaltensmodelle wird bei Verkehrssimulationen nicht immer das reale Verhalten der Verkehrsteilnehmer nachgebildet werden. U.a. werden vorausschauende Fahrstrategien nicht berücksichtigt und kooperative Verhaltensweisen lediglich bei Fahrstreifenwechseln vereinfacht nachgebildet. Um die Repräsentativität mikroskopischer Verkehrsszenarien zu steigern, wären somit Modelle zu entwickeln, die das Verhalten von Fahrern in einem realistischerem Umfang nachbilden. Dabei ist abzuwägen, ob die verbesserten Simulationsergebnisse den deutlich umfangreicheren Modellierungsaufwand bei der Szenarienerstellung und den höheren Rechendauern rechtfertigen.

Bei der Kalibrierung von Verkehrsszenarien wird eine Routenoptimierung mit Cadyts vorgenommen, das die Reisedauern in größtmöglicher Konsistenz mit gemessenen Verkehrsstärken minimiert. Während der Optimierung wird angenommen, dass jeder Fahrer vollständige Kenntnis über den vorherrschenden Verkehrszustand hat, wodurch sich Abweichungen zum realen Verkehr ergeben. Um den vorherrschenden Verkehr in Simulationen mithilfe einer Routenkalibrierung realistischer nachzubilden, sind die Implementierung einer unvollständigen Kenntnis über den Verkehrszustand und die zusätzliche Berücksichtigung von gemessenen Abbiegewahrscheinlichkeiten an Kreuzungen erforderlich. Für eine entsprechende Kalibrierung müssen diese Daten jedoch vorliegen oder in aufwendigen Messkampagnen erhoben werden.

Während die Parametrierung des Energiemodells von den Fahrzeugtypen Bus und Fließhecklimousine in dieser Arbeit auf Grundlage von Messdaten vorgenommen und validiert werden kann, basieren einige Parameter der weiteren Fahrzeugtypen auf Schätzungen. Die Genauigkeit der Energiebedarfsrechnungen könnte mit Messdaten aus weiteren Fahrzeugen unterschiedlicher Fahrzeugtypen deutlich gesteigert werden.

Für die Ermittlung von optimalen Ladestellenanordnungen berücksichtigt das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren positionsabhängige Errichtungskosten für Ladestellen. Aufgrund mangelnder Daten wurden diese jedoch als konstant angenommen. Bei weiteren Optimierungen sollten entweder positionsabhängige Kosten für die Ladestellen berücksichtigt oder zumindest eine große Streuung dieser ausgeschlossen werden. Um die Parametrierung der Errichtungskosten zu erleichtern, ist eine Erweiterung von eNetEditor mit grafischen Funktionsbausteinen denkbar. Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Berücksichtigung von dynamischen Kostenentwicklungen während des Infrastrukturausbaus, mit der bspw. geringere Kosten von Ladestellen in der Umgebung von bereits bestehenden Ladestellen berücksichtigt werden könnten.

Bei der Energieübertragung wurde vereinfacht eine konstante Ladeleistung angenommen. In der Praxis ergibt sich die Ladeleistung bei Batterien aus einer nichtlinearen Kennlinie zwischen Ladestrom und Ladezustand und wird üblicherweise bei hohen bzw. niedrigen Ladezuständen zum Schutz der Batterie gedrosselt. Darüber hinaus sind die Ladeleistung als auch die Kapazität vom Innenwiderstand der Batterie abhängig, der im Laufe der Batterielebensdauer ansteigt und damit den Wirkungsgrad der Batterie senkt. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, müssten zum einen Daten über die Verteilung der Lade- und Alterungszustände von Batterien in Elektrofahrzeugen vorliegen. Zum anderen müsste unter Berücksichtigung dieser Nichtlinearität ein nichtlineares Optimierungsmodell eingesetzt werden. Es ist zu untersuchen, ob Lösungsverfahren existieren, mit denen dieses gelöst werden könnte. Es ist ggf. die Entwicklung eines Lösungsverfahrens erforderlich.

Mit der weiteren Entwicklung und Einführung alternativer Antriebs- und Versorgungskonzepte ergeben sich neue politische und wirtschaftliche Handlungsmöglichkeiten, für die in [Kieckhäfer, 2013; Wansart, 2012] umfangreiche Modelle entwickelt und untersucht werden. Aufgrund der Vielfalt neuer Entwicklungen und der Zunahme von Elektrofahrzeugen im Straßenverkehr ist in künftigen Arbeiten eine Bestandsaufnahme empfehlenswert, um die entwickelten Modelle zu erweitern. Darauf aufbauend könnten aktualisierte Handlungsempfehlungen erarbeitet werden, um nachhaltige Mobilitätskonzepte unter Berücksichtigung des aktuellen Infrastrukturausbaus und angestrebter Migrationsszenarien gezielt und effizient zu fördern.

# A Erstellung mikroskopischer Verkehrsszenarien mit SUMO

Für die Definition und Erstellung mikroskopischer Verkehrsszenarien stellen die nachfolgenden Abschnitte den erforderlichen Ablauf unter Verwendung beispielhafter Definitionen dar.

## A.1. Definition von Infrastrukturkonstituenten

In den folgenden Abschnitten werden beispielhafte, xml-basierte Definitionen von Infrastrukturkonstituenten in SUMO und die anschließende Erstellung der zugehörigen Netzbeschreibung gezeigt.

### A.1.1. Definition von Knoten

Listing A.1: Beispielhafte Knotendefinition für SUMO im xml-Format, die in einer .nod.xml-Datei abgelegt wird; diese Definitionen müssen zur Berücksichtigung `netconvert.exe` übergeben werden

```
<nodes>
  <node id="1" type="priority" x="1106.1567" y="339.0299" z="0"/>
  <node id="2" type="traffic_light" x="1074.5522" y="419.4776" z="0"/>
  <node id="3" type="priority" x="1221.0821" y="485.5597" z="0"/>
  <node id="4" type="priority" x="1313.4383" y="527.0634" z="0"/>
  <node id="5" type="right_before_left" x="1258.4328" y="405.1119" z="0"/>
  <node id="6" type="right_before_left" x="1347.5" y="443.8993" z="0"/>
  ...
</nodes>
```

### A.1.2. Definition von Kanten

Listing A.2: Beispielhafte Kantendefinition für SUMO im xml-Format, die in einer .edg.xml-Datei abgelegt wird; diese muss für eine Berücksichtigung an `netconvert.exe` übergeben werden

```
<edges>
  <edge from="1" id="1to5" numLanes="1" priority="4" speed="8.333" to="5"
  intensityProfile="TGw3West" numVeh="1050"/>
  <edge from="1" id="1to11" numLanes="1" priority="4" speed="8.333" to="11"
  intensityProfile="TGw3West" numVeh="1050"/>
  <edge from="1" id="1to13" numLanes="2" priority="9" speed="13.889" to="13"
  intensityProfile="TGw1West" numVeh="14900"/>
  <edge from="1" id="1to17" numLanes="2" priority="9" speed="13.889" to="17"
  intensityProfile="TGw1West" numVeh="15050"/>
```

```

<edge from="2" id="2to3" numLanes="2" priority="7" speed="13.889" to="3"
intensityProfile="TGw2West" numVeh="4950"/>
...
</edges>

```

### A.1.3. Definition zulässiger Fahrstreifenverbindungen an Knoten

Listing A.3: Beispielhafte Definition zulässiger Fahrstreifenverbindungen an Knoten für SUMO im xml-Format, die in einer .con.xml-Datei abgelegt wird; diese muss für eine Berücksichtigung an netconvert.exe übergeben werden

```

<connections>
  <connection from="110to105" fromLane="0" to="105to66" toLane="0"/>
  <connection from="110to105" fromLane="1" to="105to66" toLane="1"/>
  <connection from="110to105" fromLane="2" to="105to124" toLane="0"/>
  <connection from="110to105" fromLane="3" to="105to124" toLane="1"/>
  <connection from="110to105" fromLane="4" to="105to107" toLane="0"/>
  <connection from="110to105" fromLane="4" to="105to107" toLane="1"/>
  ...
</connections>

```

### A.1.4. Definition fahrstreifenspezifischer Parameter

Listing A.4: Beispielhafte individuelle Parametrierung eines Fahrstreifens für SUMO im xml-Format, die in der Kantendefinitionsdatei (mit Dateinamensendung .edg.xml) vorgenommen wird; diese muss für eine Berücksichtigung an netconvert.exe übergeben werden

```

<edges>
  <edge from="2" id="2to17" numLanes="2" priority="9" speed="13.889" to="17"/>
  <edge from="2" id="2to18" numLanes="2" priority="7" speed="13.889" to="18"/>
  <edge from="2" id="2to19" numLanes="2" priority="9" speed="13.889" to="19">
    <lane allow="bus, taxi" index="0" width="4" speed="8.333"/>
  </edge>
  <edge from="3" id="3to2" numLanes="2" priority="7" speed="13.889" to="2" />
  <edge from="3" id="3to4" numLanes="2" priority="7" speed="13.889" to="4" />
  <edge from="3" id="3to5" numLanes="1" priority="4" speed="8.333" to="5" />
  ...
</edges>

```

### A.1.5. Definition von Haltestellen

Listing A.5: Beispielhafte Definition von Haltestellen für SUMO im xml-Format, die in einer .add.xml-Datei abgelegt wird; diese muss für eine Berücksichtigung **nicht** an netconvert.exe für die Netzdateierstellung, sondern in der Konfigurationsdatei der Simulation (mit Dateinamensendung .sumo.cfg) unter dem Attribut additional definiert werden

```

<additional>
  <busStop id="bS_2to19_0a" lane="2to19_0" startPos="10" endPos="25"/>
  <busStop id="bS_54to72_0a" lane="54to72_0" startPos="10" endPos="25"/>

```

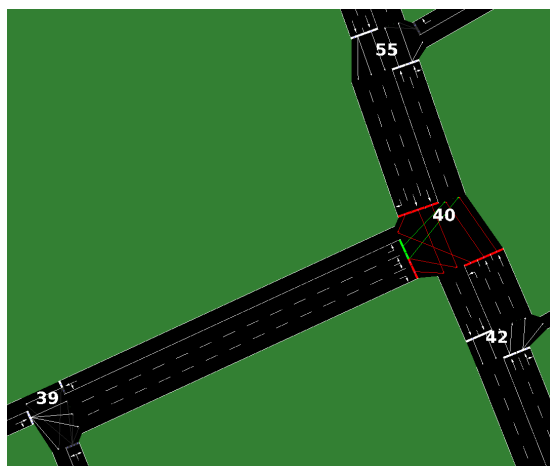
```

<busStop id="bS_111to113_0a" lane="111to113_0" startPos="10" endPos="25"/>
<busStop id="bS_132to135_0a" lane="132to135_0" startPos="10" endPos="25"/>
...
</additional>

```

### A.1.6. Definition von Lichtsignalanlagen

Bei der Parametrierung von Lichtsignalanlagen ist die Codierung der Zustände zu beachten. Die einzelnen Elemente des Zustandsvektors (in SUMO: state) in der Definition einer Phase entsprechen dabei den Fahrstreifenverbindungen am entsprechenden Knoten, die wiederum in der erstellten Netzdefinition (mit der Dateinamensendung .net.xml-Datei) unter den xml-Tags connection und deren Attributen linkIndex definiert sind. Der Zustandsvektor wird in aufsteigender Reihenfolge beginnend mit linkIndex 0 parametrierung. Zur Unterstützung bei dieser Parametrierung wurde bei eNetEditor eine Funktion implementiert, die nach der Netzdefinitionsdateierstellung mit netconvert.exe eine Analyse der resultierenden Netzdefinitionsdatei vornimmt und eine Übersicht der bestehenden Fahrstreifenverbindungen und deren Indizes an Knoten erstellt, die mit einer Lichtsignalanlage definiert wurden. Abbildung A.1 zeigt eine dieser beispielhaften Übersichten, wohingegen Listing A.6 die relevanten Auszüge aus der Netzdefinitionsdatei (mit der Dateinamensendung .net.xml) beinhaltet.



node	link_index	link_from	link_to
'40'	[0]	'42to40_0'	'40to55_0'
'40'	[1]	'42to40_1'	'40to55_1'
'40'	[2]	'42to40_2'	'40to39_0'
'40'	[3]	'39to40_0'	'40to42_0'
'40'	[4]	'39to40_1'	'40to42_1'
'40'	[5]	'39to40_1'	'40to55_0'
'40'	[6]	'39to40_2'	'40to55_1'
'40'	[7]	'55to40_0'	'40to39_0'
'40'	[8]	'55to40_1'	'40to42_0'
'40'	[9]	'55to40_2'	'40to42_1'

Abbildung A.1.: Aufbau des lichtsignalgesteuerten Knotens 40 (links) und Übersicht über bestehende Fahrstreifenverbindungen zur Unterstützung bei der a-posteriori-Parametrierung des zugehörigen Lichtsignalzeit- und -zustandsplans in der Netzdefinitionsdatei (rechts)

Listing A.6: Beispielhafter Auszug aus einer xml-basierten Netzdefinitionsdatei (mit Dateinamensendung .net.xml) für SUMO zur Analyse bestehender Fahrstreifenverbindungen (in SUMO: connection), insb. ihrer Indizes (in SUMO: linkIndex) und (a-posteriori-)Definition eines statischen Signalzeit- und -zustandsplans für eine Lichtsignalanlage am Knoten 40

```
<net ...>
  ...
  <connection from="42to40" to="40to55" fromLane="0" toLane="0" tl="40" linkIndex="0" .../>
  <connection from="42to40" to="40to55" fromLane="1" toLane="1" tl="40" linkIndex="1" .../>
  :
  <connection from="55to40" to="40to42" fromLane="2" toLane="1" tl="40" linkIndex="9" .../>
  ...
  <tlLogic id="40" type="static" programID="0" offset="0">
    <phase duration="4" state="rrrrrGGrrr"/>
    <phase duration="3" state="rrrrryyrrr"/>
    <phase duration="5" state="rrrrrrrrrr"/>
    <phase duration="2" state="rrrrrrrGGG"/>
    <phase duration="32" state="GGrrrrrGGG"/>
    <phase duration="3" state="GGrrrrryyy"/>
    <phase duration="3" state="yyrrrrrrrr"/>
    <phase duration="1" state="rrrrrrrrrr"/>
    <phase duration="1" state="rrGrrrrrrr"/>
    <phase duration="9" state="rrGGGrrrrr"/>
    <phase duration="2" state="rryGGrrrrr"/>
    <phase duration="1" state="rryyyrrrrr"/>
    <phase duration="2" state="rrryyrrrrr"/>
    <phase duration="1" state="rrrrrrrrrr"/>
    <phase duration="16" state="rrrrrGGrrr"/>
  </tlLogic>
  ...
</net>
```

### A.1.7. Definition von Ladestellen

Listing A.7: Beispielhafte Definition von Ladestellen für SUMO im xml-Format, die in einer .chrg.xml-Datei abgelegt wird; diese muss für eine Berücksichtigung **nicht** an netconvert.exe (für die Netzdateierstellung), sondern in der Konfigurationsdatei der Simulation (mit Dateinamensendung sumo.cfg) unter dem Attribut additional definiert werden

```
<additional>
  <chargingStation id="cS_2to19_0a" lane="2to19_0" startPos="10" endPos="25" chrgpower=
    "200000" efficiency="0.95" chargeDelay="2" chargeInTransit="0" eType="a"/>
  <chargingStation id="cS_17to2_0a" lane="17to2_0" startPos="0" endPos="62" chrgpower=
    "220000" efficiency="0.9" chargeDelay="5" chargeInTransit="1" eType="b"/>
  <chargingStation id="cS_17to2_1a" lane="17to2_1" startPos="0" endPos="62" chrgpower=
    "250000" efficiency="0.9" chargeDelay="5" chargeInTransit="1" eType="a"/>
  ...
</additional>
```



```
</additional>
```

### A.1.8. Erstellung einer Netzdefinitionsdatei

Die Erstellung einer Netzdefinitionsdatei mit `netconvert.exe` erfolgt mit dem in Listing A.8 gezeigten Syntax. Bushalte- und Ladestellen werden in Form sog. additional Dateien definiert. Für deren Berücksichtigung während einer Simulation werden diese nicht in die Netzdefinitionsdatei aufgenommen, sondern müssen in einer entsprechenden SUMO-Konfigurationsdatei referenziert werden. Ein Beispiel hierfür ist unter Abschnitt A.5 in Listing A.23 zu finden.

Listing A.8: Syntax für die Erstellung einer Netzdatei mit `netconvert.exe` für die Nutzung in SUMO

```
netconvert.exe -n scenario.nod.xml -e scenario.edg.xml -x scenario.con.xml -o scenario.net.xml [-a scenario.lsa.xml]
```

## A.2. Definition von Fahrzeugtypen

Um die Objekte einzelner Verkehrsmittel zu instanziierten, müssen in SUMO vorher ihre zugehörigen Fahrzeugtypen definiert werden. Die Definition von Fahrzeugtypen kann entweder direkt erfolgen (siehe Listing A.9) oder durch Definition von Fahrzeugtypverteilungen (siehe Listing A.10).

Listing A.9: Beispielhafte Definition eines Fahrzeugtyps mit Parametrierung des Fahrzeugfolgeverhaltens nach [Krauß, 1998] und des Energiemodells nach [Kurzveil et al., 2014]

```
<vType id="elektroFzg" maxSpeed="42" length="4.5" minGap="2.5" speedDev="0.05"
  speedFactor="1.1" impatience="0.1">
  <carFollowing-Krauss accel="2.00" decel="5.00" sigma="0.5" tau="1.00"/>
  <param key="MaxBatKap" value="20000"/>
  <param key="PowerMax" value="80000"/>
  <param key="Mass" value="2000"/>
  <param key="InternalMomentOfInertia" value="50"/>
  <param key="FrontSurfaceArea" value="2.0"/>
  <param key="AirDragCoefficient" value="0.4"/>
  <param key="RadialDragCoefficient" value="0"/>
  <param key="RollDragCoefficient" value="0.15"/>
  <param key="ConstantPowerIntake" value="40"/>
  <param key="PropulsionEfficiency" value="0.8"/>
  <param key="RecuperationEfficiency" value="0.5"/>
  <param key="EnType" value="a"/>
</vType>
```

Listing A.10: Beispielhafte Definition einer Fahrzeugtypverteilung

```
<vTypeDistribution id="PKW">
  <vType class="passenger" id="pkw1" color=".8,.2,.2" minGap="1.5" accel="2.6" decel="
    4.5" sigma=".5" length="4.5" maxSpeed="70" vClass="private" probability="0.4"
    guiShape="passenger/sedan"/>
  <vType class="passenger" id="pkw2" color=".2,.8,.2" minGap="1.5" accel="3.0" decel="
    4.5" sigma=".5" length="4.5" maxSpeed="70" vClass="private" probability="0.2"
    guiShape="passenger/hatchback"/>
</vTypeDistribution>
```

```

<vType class="passenger" id="pkw3" color=".2,.2,.8" minGap="1.5" accel="2.0" decel="
  4.5" sigma=".5" length="4.5" maxSpeed="70" vClass="private" probability="0.4"
  guiShape="passenger/wagon"/>
</vTypeDistribution>
<vTypeDistribution id="LKW">
  <vType class="bus" id="bus1" color=".4,.6,.6" minGap="1.5" accel="1.5" decel="4.5"
    sigma=".5" length="18" maxSpeed="23" vClass="private" probability=".3" guiShape="
    bus/flexible"/>
  <vType class="transport" id="lkw1" color=".6,.4,.6" minGap="1.5" accel="2" decel="
    4.5" sigma=".5" length="9" maxSpeed="25" vClass="private" probability=".7"
    guiShape="truck"/>
</vTypeDistribution>

```

## A.3. Definition von Verkehrsnachfrage

In den folgenden Abschnitten werden die in SUMO verfügbaren Methoden der Verkehrsmittelinanziierung in Form beispielhafter Definitionen vorgestellt und ggf. erforderliche Aufrufe gezeigt.

### A.3.1. Manuelle Instanziierung von Fahrzeugen

Listing A.11: Beispielhafte Instanziierung eines Fahrzeugs einschließlich eines Anfangsenergiegehalts mit dem Attribut ActBatKap (in Wh)

```

<routes>
  <vehicle depart="1.00" departLane="0" departSpeed="9" id="eFzg1" type="elektroFzg">
    <route edges="1to13 ... 2to19 ... "/>
    <stop busStop="bS_2to19_0a" duration="20"/>
    <param key="ActBatKap" value="1000"/>
  </vehicle>
</routes>

```

Listing A.12: Beispielhafte Instanziierung von Fahrzeugen mit wiederkehrenden Routen unter Nutzung der drei möglichen Parameter period (deterministische Dauer zwischen zugehörigen Fahrzeuginstanzen, in Sekunden), vehsPerHour (deterministische Dauer zwischen zugehörigen Fahrzeuginstanzen, in Fahrzeugen pro Stunde) sowie probability (Wahrscheinlichkeit einer Fahrzeuginstanziierung pro Sekunde)

```

<flow id="typ1" color="1,1,0" begin="0" end="3600" period="600" type="bus1">
  <route edges="1to13 13to16"/>
  <stop busStop="station1" duration="30"/>
</flow>
<flow id="typ2" color="0,1,1" begin="3600" end="7200" vehsPerHour="4" type="bus1">
  <route edges="1to13 13to16"/>
  <stop busStop="station1" duration="20"/>
</flow>
<flow id="typ3" color="1,0,1" begin="7200" end="10800" probability="0.001" type="bus1">
  <route edges="1to13 13to16"/>

```

```

    <stop busStop="station1" duration="10"/>
</flow>

```

### A.3.2. Fahrzeuginstanziierung und Routenbildung mit DFROUTER

Listing A.13: Beispielhafte Definition von Detektoren (Induktionsmessschleifen)

```

<detectors>
  <detectorDefinition id="det0_1to5_0" lane="1to5_0" pos="0"/>
  <detectorDefinition id="det1_1to11_0" lane="1to11_0" pos="0"/>
  <detectorDefinition id="det2_1to13_0" lane="1to13_0" pos="0"/>
  <detectorDefinition id="det3_1to13_1" lane="1to13_1" pos="0"/>
</detectors>

```

Listing A.14: Beispielhafte Definition von Detektormessdaten für die Routenbildung mittels DFROUTER (die Angabe der Aggregationsintervalle unter Time erfolgt mit der Einheit **Minuten**)

```

Detector;Time;qPKW;vPKW;qLKW;vLKW
det0_1to5_0;0;4.2989;7;0.22626;5
det0_1to5_0;20;8.334;7;0.43863;5
det0_1to5_0;40;10.5241;7;0.5539;5
det0_1to5_0;60;16.2798;7;0.85683;5
det1_1to11_0;0;4.4204;7;0.23265;5
det1_1to11_0;20;7.1806;7;0.37793;5
det1_1to11_0;40;12.4429;7;0.65489;5
det1_1to11_0;60;16.4115;7;0.86376;5

```

Listing A.15: Syntax für die Fahrzeuginstanziierung und Routenbildung mittels DFROUTER

```

dfrouter --random 1 --net-file scenario.net.xml --detector-files scenario.det.xml --
measure-files scenario.flowMeas.xml --routes-output scenario.rou.xml --emitters-
output scenario.veh.xml --time-step 1200 --departlane random --departspeed random --
vtype true

```

### A.3.3. Fahrzeuginstanziierung und Routenbildung mit JTRROUTER

Listing A.16: Beispielhafte Definition von Fahrzeugflüssen

```

<flows>
  <flow id="86to11flow1" begin="0" end="8640" from="86to11" number="88" type="PKW"
    departLane="random" departSpeed="random"/>
  <flow id="87to13flow1" begin="0" end="8640" from="87to13" number="90" type="PKW"
    departLane="random" departSpeed="random"/>
  <flow id="88to13flow2" begin="0" end="8640" from="88to13" number="15" type="LKW"
    departLane="random" departSpeed="random"/>
</flows>

```

Listing A.17: Beispielhafte Definition von Abbiegewahrscheinlichkeiten an einem betrachteten Knoten 29

```

<turns>
  <fromEdge id="23to29">

```

```

    <toEdge id="29to30" probability="0.2"/>
    <toEdge id="29to33" probability="0.3"/>
    <toEdge id="29to34" probability="0.5"/>
  </fromEdge>
  <fromEdge id="30to29">
    <toEdge id="29to23" probability="0.1"/>
    <toEdge id="29to33" probability="0.2"/>
    <toEdge id="29to34" probability="0.7"/>
  </fromEdge>
  ...
</turns>

```

Listing A.18: Syntax für die Fahrzeuginstanziierung und Routenbildung mittels DFROUTER

```

jtrrouter --random 1 -f scenario.flows.xml -t scenario.turns.xml -n scenario.net.xml -o
scenario.rou.xml

```

## A.4. Kalibrierung von Verkehrsnachfrage

In den folgenden Abschnitten werden zwei Werkzeuge der Routenkalibrierung in Form beispielhafter Definitionen vorgestellt und die dafür erforderlichen Aufrufe gezeigt. In Abschnitt A.4.1 wird die Kalibrierung mit DUAROUTER und in Abschnitt A.4.2 mit Cadyts vorgestellt.

### A.4.1. Kalibrierung von Fahrzeugrouten mit DUAROUTER

Als Eingabe erfordert DUAROUTER die Definition der Verkehrsnachfrage in Form von Fahrten, mit Angabe von Quelle, Ziel, Fahrzeugtyp und Abfahrtszeitpunkt. Eine entsprechende beispielhafte Definition findet sich in Listing A.19. Listing A.20 zeigt anschließend den erforderlichen Aufruf für die iterative Routenkalibrierung mit DUAROUTER.

Listing A.19: Beispielhafte Definition der Verkehrsnachfrage in Form von Fahrten für die spätere Nutzung durch DUAROUTER

```

<trips>
  <trip depart="0.00" departLane="random" departPos="0" departSpeed="random" from="82
    to49" id="emitter_det211_82to49_0_0" to="13to16" type="PKW"/>
  <trip depart="0.00" departLane="random" departPos="0" departSpeed="random" from="83
    to33" id="emitter_det212_83to33_0_0" to="10to27" type="PKW"/>
  <trip depart="0.00" departLane="random" departPos="0" departSpeed="random" from="84
    to23" id="emitter_det213_84to23_0_0" to="13to16" type="PKW"/>
  <trip depart="0.00" departLane="random" departPos="0" departSpeed="random" from="85
    to10" id="emitter_det214_85to10_0_0" to="23to28" type="PKW"/>
  <trip depart="0.00" departLane="random" departPos="0" departSpeed="random" from="85
    to10" id="emitter_det215_85to10_1_0" to="4to9" type="PKW"/>
  <trip depart="0.00" departLane="random" departPos="0" departSpeed="random" from="86
    to11" id="emitter_det216_86to11_0_0" to="13to16" type="PKW"/>
  ...
</trips>

```

Listing A.20: Syntax für den Aufruf von DUAROUTER für die iterative Fahrzeugrouten-Kalibrierung mit 20 Iterationen (-l)

```
duaIterate.py -n scenario.net.xml -t scenario.trips.xml -x detailed -- "scenario.vtypes.xml,scenario.add.chrg.xml,scenario.add.bStop.xml" -l 20
```

#### A.4.2. Kalibrierung disaggregierter Verkehrsnachfrage mit Hilfe von Verkehrszählungen mit cadyts

Als Eingabe erfordert cadyts neben der Verkehrsnachfragedefinitionen auch die Definition von Verkehrszählungen, mit der durch die Einführung von Zeiträumen auch ein Tagesgang nachgebildet werden kann. Eine entsprechende beispielhafte Definition findet sich in Listing A.21. Darüber hinaus ist die Definition von alternativen Routen erforderlich, die z. B. mit dem Python-Script `route2alts.py` erstellt werden können oder von DUAROUTER ausgegeben werden. Listing A.22 zeigt anschließend den erforderlichen Aufruf für die iterative Routenkalibrierung mit cadyts.

Listing A.21: Beispielhafte Definition der Verkehrszählungen auf Kanten der betrachteten Verkehrsweginfrastruktur

```
<measurements>
  <onlink start="0000" end="1199" link="1to11" value="4.280" stddev="0.428" type="COUNT_VEH"/>
  <onlink start="1200" end="2399" link="1to11" value="8.158" stddev="0.816" type="COUNT_VEH"/>
  <onlink start="2400" end="3599" link="1to11" value="12.04" stddev="1.204" type="COUNT_VEH"/>
  <onlink start="3600" end="4799" link="1to11" value="15.91" stddev="1.592" type="COUNT_VEH"/>
  <onlink start="4800" end="5999" link="1to11" value="19.39" stddev="1.939" type="COUNT_VEH"/>
  <onlink start="0000" end="1199" link="1to13" value="4.280" stddev="0.428" type="COUNT_VEH"/>
  <onlink start="1200" end="2399" link="1to13" value="8.158" stddev="0.816" type="COUNT_VEH"/>
  <onlink start="2400" end="3599" link="1to13" value="12.04" stddev="1.204" type="COUNT_VEH"/>
  ...
</measurements>
```

Listing A.22: Syntax für den Aufruf von Cadyts für die iterative Fahrzeugrouten-Kalibrierung mit 20 Iterationen (-l) und einer Aggregationsdauer von 1 200 s (-a)

```
cadytsIterate.py -b 0 -n scenario.net.xml -d scenario.calibFlowMeas.xml -- "scenario.vtypes.xml,scenario.add.chrg.xml,scenario.add.bStop.xml" -r scenario.rou.alt.xml -W scenario.flowsEvaluation.txt -l 20 -a 1200
```

## A.5. Erstellung einer SUMO Konfigurationsdatei

Sind alle für ein Szenario erforderlichen Definitionen erstellt, kann eine SUMO Konfigurationsdatei angelegt werden, die auf die einzelnen Dateien referenziert. Listing A.23

zeigt ein Beispiel für eine solche SUMO-Konfigurationsdatei.

Listing A.23: Beispielhafte SUMO-Konfigurationsdatei

```
<configuration>
  <input>
    <net-file value="scenario.net.xml"/>
    <route-files value="scenario.rou.xml"/>
    <additional-files value="scenario.add.bStop.xml,scenario.add.chrgStn.xml"/>
  </input>
  <output>
    <battery-output value="scenario.battery.out.xml"/>
    <battery-output.precision value="4"/>
    <device.battery.probability value="1"/>
  </output>
  <time>
    <begin value="0"/>
  </time>
  <processing>
    <no-internal-links value="false"/>
    <time-to-teleport value="300.0"/>
    <time-to-teleport.highways value="300.0"/>
  </processing>
</configuration>
```

## A.6. Simulationsausgabe des Energiemodells

Sind Fahrzeuge mit Energiebedarfsrelevanten Parametern in SUMO instanziiert, erfolgt die Ausgabe der Energiezustände von betrachteten Fahrzeugen in Form einer xml-Datei. Der Dateiname wird in der SUMO-Konfigurationsdatei gemäß Listing A.23 unter dem xml-Attribut `battery-output` spezifiziert. Die Struktur der Ausgabedatei ist beispielhaft in Listing A.24 dargestellt.

Listing A.24: Beispielhafte Ausgabedatei des SUMO-Battery-Devices

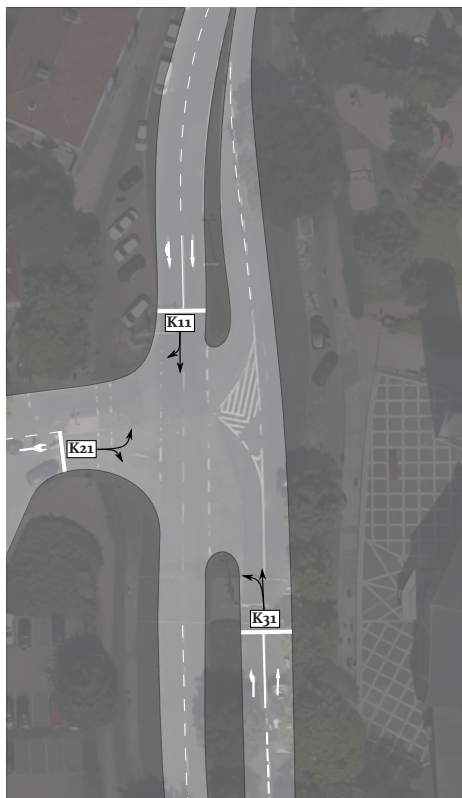
```
<battery-export>
  <timestep time="0.00">
    <vehicle id="Fzg_314" Consum="15.5463" ActBatKap="6684.4537" MaxBatKap="20000.0"
      ChrgStnId="NULL" Charge="0.0" ChargeInTransit="0.0" ChargeStopped="0.0" speed
        ="13.2" acceleration="2.0" x="1428.3" y="25.6" lane="76to16_0" posOnLane="
        13.2" timeStopped="0"/>
    ... weitere Fahrzeuge (vehicle) ...
  </timestep>
  ... weitere Zeitschritte (timestep) ...
</battery-export>
```



# B Erhobene Lichtsignalzeit- und -zustandspläne

In den folgenden Abschnitten werden erhobene Lichtsignalzeit- und -zustandspläne für lichtsignalgesteuerte Kreuzungen im Untersuchungsraum dargestellt.

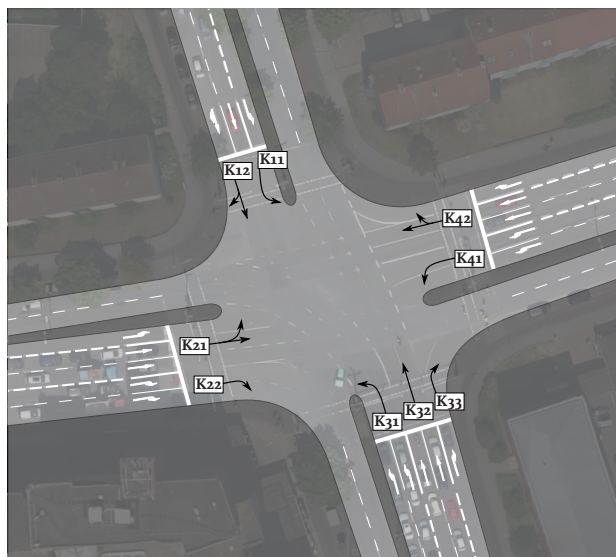
## B.1. Kreuzung Nordstraße/Bültenweg



Signal	Dauer in s						
	10	4	1	18	4	7	41
K11	Green	Yellow	Red	Red	Red	Red	Green
K21	Red	Red	Green	Yellow	Red	Red	Red
K31	Green	Yellow	Red	Red	Red	Red	Green

Abbildung B.1.: Schematischer Knotenplan der Kreuzung Nordstraße/Bültenweg (links) mit Signalzeit- und -zustandsplan (rechts)

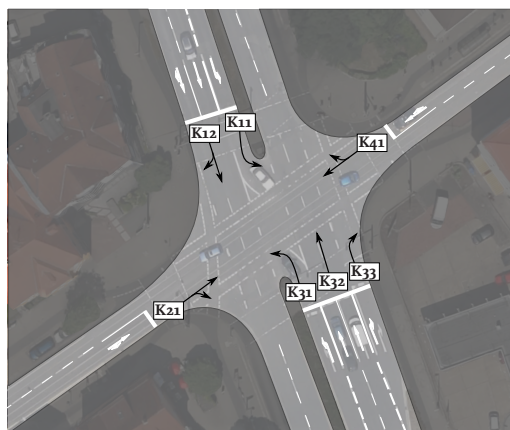
## B.2. Kreuzung Rebenring/Hagenring



Signal	Dauer in s																											
	2	2	11	3	3	1	7	1	11	1	2	1	2	3	2	12	3	5	4	3	3	3						
K11																												
K12																												
K21																												
K22																												
K31																												
K32																												
K33																												
K41																												
K42																												

Abbildung B.2.: Schematischer Knotenplan der Kreuzung Rebenring/Hagenring (links) mit Lichtsignalzeit- und -zustandsplan (rechts)

## B.3. Kreuzung Gliesmaroder Straße/Hagenring (Referenz)



	Dauer in s													
Signal	8	3	37	2	1	4	3	1	15	3	3	3	2	
K11														
K12														
K21														
K31														
K32														
K33														
K41														

Abbildung B.3.: Schematischer Knotenplan der Kreuzung Gliesmaroder Straße/Hagenring (links) mit Signalzeit- und -zustandsplan (rechts)

B.4. Kreuzung Humboldtstraße/Hagenring

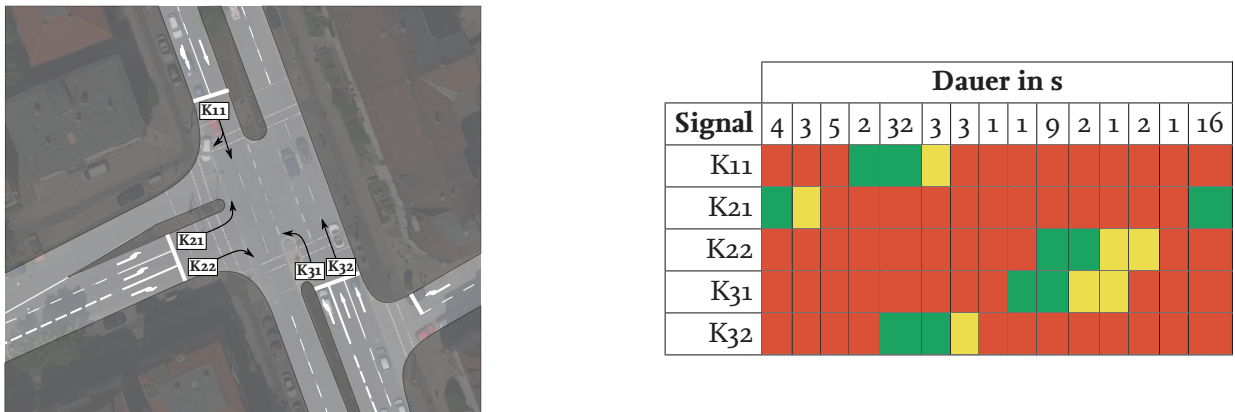


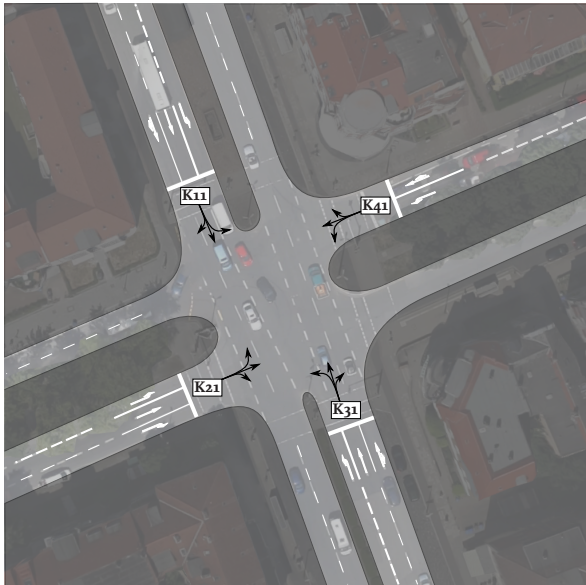
Abbildung B.4.: Schematischer Knotenplan der Kreuzung Humboldtstraße/Hagenring (links) mit Signalzeit- und -zustandsplan (rechts)

B.5. Fußgängerüberweg Heinrichstraße/Hagenring



Abbildung B.5.: Schematischer Knotenplan des Fußgängerüberwegs Heinrichstraße/Hagenring (links) mit Signalzeit- und -zustandsplan (rechts)

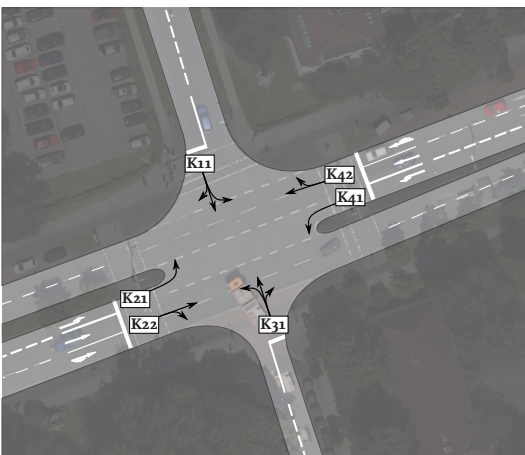
## B.6. Kreuzung Jasperallee/Hagenring



Signal	Dauer in s						
	20	15	3	5	37	3	2
K11							
K21							
K31							
K41							

Abbildung B.6.: Schematischer Knotenplan der Kreuzung Jasperallee/Hagenring (links) mit Signalzeit- und -zustandsplan (rechts)

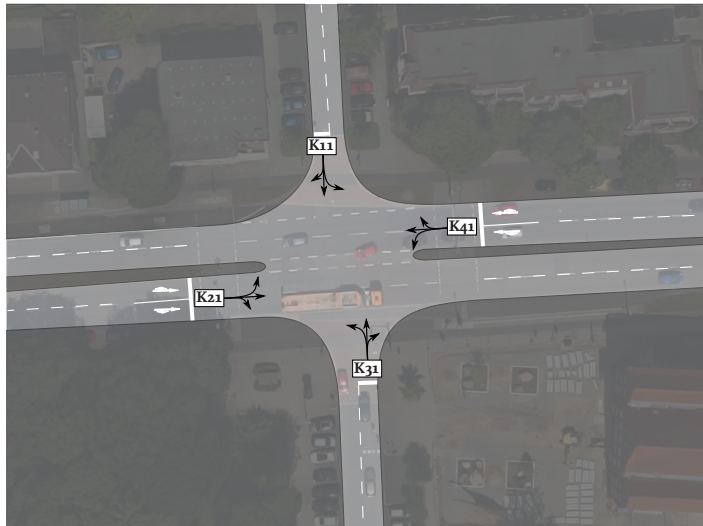
## B.7. Kreuzung Hans-Sommer-Straße/Langer Kamp



Signal	Dauer in s							
	6	4	1	54	4	1	4	11
K11								
K21								
K22								
K31								
K41								
K42								

Abbildung B.7.: Schematischer Knotenplan der Kreuzung Hans-Sommer-Straße/Langer Kamp (links) mit Signalzeit- und -zustandsplan (rechts)

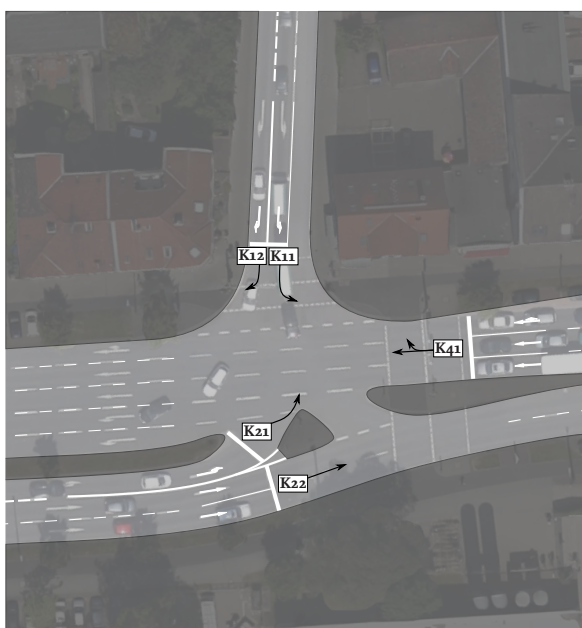
## B.8. Kreuzung Rebenring/Pockelsstraße



	Dauer in s								
Signal	29	3	4	3	1	14	3	9	20
K11									
K21									
K31									
K41									

Abbildung B.8.: Schematischer Knotenplan der Kreuzung Rebenring/Pockelsstraße (links) mit Signalzeit- und -zustandsplan (rechts)

## B.9. Kreuzung Rebenring/Mittelweg

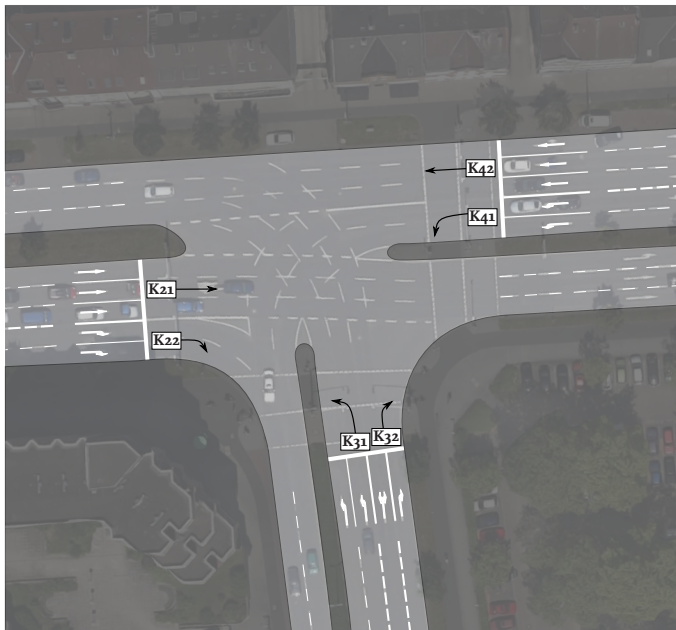


	Dauer in s									
Signal	20	4	1	14	4	1	21	4	6	10
K11										
K12										
K21										
K22										
K41										

Abbildung B.9.: Schematischer Knotenplan der Kreuzung Rebenring/Mittelweg (links) mit Signalzeit- und -zustandsplan (rechts)



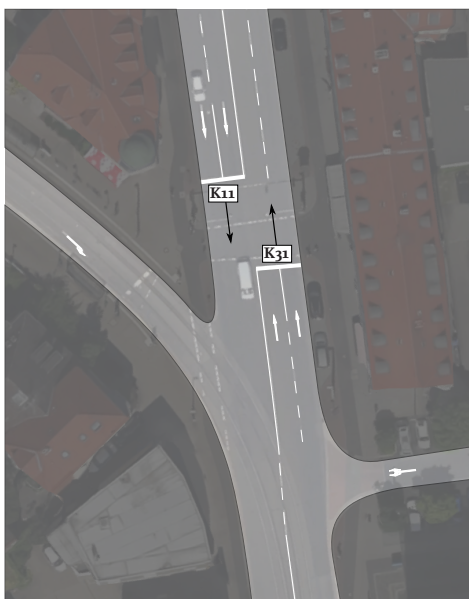
## B.10. Kreuzung Rebenring/Mühlenpfordtstraße



	Dauer in s													
Signal	22	4	1	11	4	1	4	15	4	1	5	4	1	8
K21	Green	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Green
K22	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Yellow	Red	Red	Red
K31	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red
K32	Red	Red	Red	Green	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
K41	Red	Red	Red	Green	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
K42	Green	Green	Green	Green	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green

Abbildung B.10.: Schematischer Knotenplan der Kreuzung Rebenring/Mühlenpfordtstraße (links) mit Signalzeit- und -zustandsplan (rechts)

## B.11. Fußgängerüberweg Mühlenpfordtstraße/Wendenwehr

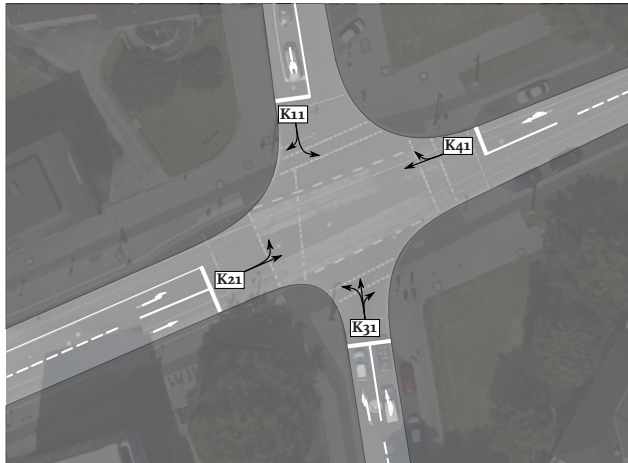


	Dauer in s			
Signal	14	4	14	53
K11	Green	Yellow	Red	Green
K32	Green	Yellow	Red	Green

Abbildung B.11.: Schematischer Knotenplan des Fußgängerüberwegs Mühlenpfordtstraße/Wendenwehr (links) mit Signalzeit- und -zustandsplan (rechts)



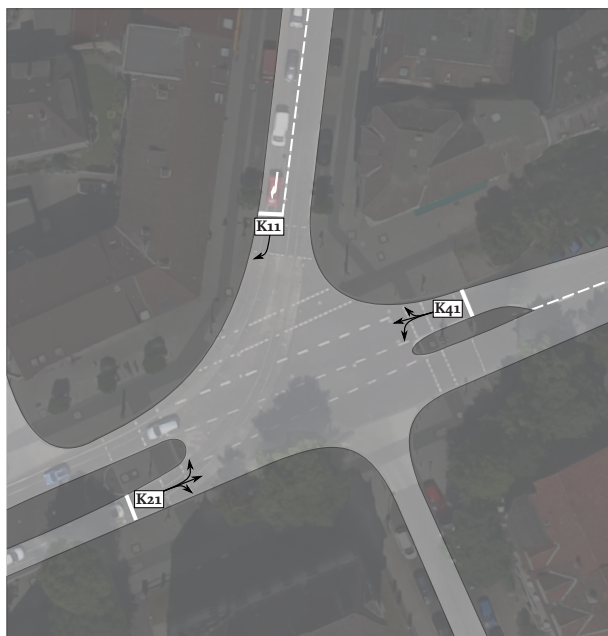
## B.12. Kreuzung Fallersleber Straße/Theaterwall



	Dauer in s						
Signal	8	14	4	1	47	4	7
K11							
K21							
K31							
K41							

Abbildung B.12.: Schematischer Knotenplan der Kreuzung Fallersleber Straße/Theaterwall (links) mit Signalzeit- und -zustandsplan (rechts)

## B.13. Kreuzung Gliesmaroder Straße/Humboldtstraße



	Dauer in s					
Signal	15	9	4	1	52	4
K11						
K21						
K41						

Abbildung B.13.: Schematischer Knotenplan der Kreuzung Gliesmaroder Straße/Humboldtstraße (links) mit Signalzeit- und -zustandsplan (rechts)



# C Schätzung der Abbiegewahrscheinlichkeiten an Kreuzungen

Eine Möglichkeit für die probabilistische Routenbildung in SUMO bietet JTRROUTER. Hierfür müssen neben eingehenden Verkehrsflüssen in den Untersuchungsraum auch Abbiegewahrscheinlichkeiten an allen Kreuzungen des Untersuchungsraums definiert werden. Ein Nachteil dieser Variante ist, dass Abbiegewahrscheinlichkeiten nur selten bekannt sind und eine Erhebung mit viel Aufwand einhergeht. Sind jedoch Verkehrsflüsse im Untersuchungsraum bekannt (bspw. in Form einer Verkehrsmengenkarte), kann mit linearen Optimierungsmethoden eine Schätzung der Abbiegewahrscheinlichkeiten erfolgen. Abbildung C.1 zeigt dazu das Schema einer Kreuzung und führt die ein- und ausgehenden Flüsse (Variablen  $F_{x,\text{ein}}$  und  $F_{x,\text{aus}}$ ) sowie die Abbiegewahrscheinlichkeiten (Variablen  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  und  $d_i$ ) ein.

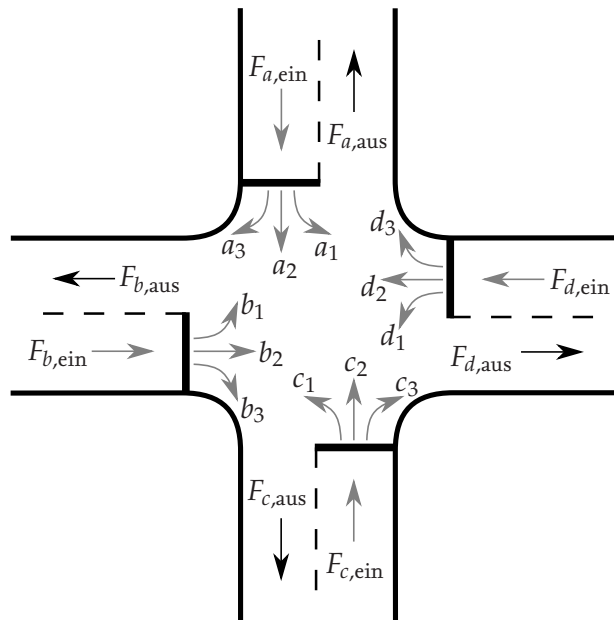


Abbildung C.1.: Schema einer Kreuzung mit ein- und ausgehenden Flüssen  $F_{x,\text{ein}}$  und  $F_{x,\text{aus}}$  sowie Abbiegewahrscheinlichkeiten  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  und  $d_i$

Unter Vernachlässigung von U-Turns an Kreuzungen sowie der Annahme, dass die Summe der eingehenden Flüsse in eine Kreuzung erhalten bleibt, kann mit den eingeführten Variablen das lineare Gleichungssystem C.1 formuliert werden. Die ausgehenden Flüsse setzen sich abhängig von den Abbiegewahrscheinlichkeiten anteilig aus den eingehenden Flüssen zusammen. Das Ziel einer Optimierung ist es, durch Wahl der Abbiegewahrscheinlichkeiten die Abweichung dieses

Gleichungssystem zu minimieren. Dieses Optimierungsziel ist in Gleichung C.2 formuliert. Bei der Variation der Abbiegewahrscheinlichkeiten gelten die Randbedingungen, dass die Abbiegewahrscheinlichkeiten jedes eingehenden Flusses sich auf 1 summieren müssen. Diese Randbedingung ist in Gleichung C.3 formuliert. Um die Freiheitsgrade des bisher unterbestimmten Gleichungssystems zu reduzieren, können Messungen der Abbiegewahrscheinlichkeiten als weitere Randbedingungen formuliert werden. Das Gleichungssystem C.3 wird dazu durch zusätzliche Zeilen in  $\underline{d}$  und  $\underline{C}$  erweitert. Darüber hinaus kann der Suchbereich für die Abbiegewahrscheinlichkeiten durch die Definition von Unter- und Oberschranken weiter eingegrenzt werden, die in Gleichung C.4 formuliert sind. Zur Lösung des beschriebenen Optimierungsproblems kann bspw. MATLABs Funktion `lsqin` verwendet werden.

Die Anwendung eines Optimierungsverfahrens bei der Ermittlung von Abbiegewahrscheinlichkeiten bietet folgende Vorteile:

- Im Fall eines unterbestimmten Gleichungssystems wird die Suchheuristik immer eine zulässige Lösung finden<sup>(1)</sup>.
- Im Fall eines überbestimmten Gleichungssystems wird der Fehler durch die Optimierung minimiert.
- In allen anderen Fällen handelt es sich um die analytische Lösung des Gleichungssystems.

$$\underbrace{\begin{pmatrix} F_{a,\text{aus}} \\ F_{b,\text{aus}} \\ F_{c,\text{aus}} \\ F_{d,\text{aus}} \end{pmatrix}}_{\underline{b}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & F_{b,\text{ein}} & 0 & 0 & 0 & F_{c,\text{ein}} & 0 & 0 & 0 & F_{d,\text{ein}} \\ 0 & 0 & F_{a,\text{ein}} & 0 & 0 & 0 & F_{c,\text{ein}} & 0 & 0 & 0 & F_{d,\text{ein}} & 0 \\ 0 & F_{a,\text{ein}} & 0 & 0 & 0 & F_{b,\text{ein}} & 0 & 0 & 0 & F_{d,\text{ein}} & 0 & 0 \\ F_{a,\text{ein}} & 0 & 0 & 0 & F_{b,\text{ein}} & 0 & 0 & 0 & F_{c,\text{ein}} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_A \underbrace{\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix}}_{\underline{x}} \quad (\text{C.1})$$

$$\min_{\underline{x}} ||A\underline{x} - \underline{b}||_2^2 \quad (\text{C.2})$$

<sup>(1)</sup>Da es sich hierbei immer um die erste zulässige Lösung handelt die von der Suchheuristik ermittelt werden konnte, sollte diese auf Plausibilität geprüft werden.

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}}_{\underline{d}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}}_{\underline{C}} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} \tag{C.3}$$

$$\underline{x}_{\min} \leq \underline{x} \leq \underline{x}_{\max} \tag{C.4}$$





# **D Fahrzeugenergiebilanzen nach erfolgter Ladestellenopti- mierung im Referenzszenario**

In diesem Kapitel werden die Histogramme von Fahrzeugenergiebilanzen veranschaulicht. Abschnitt D.1 zeigt die Fahrzeugenergiebilanzen nach Optimierung der Ladestellenanordnung für den kollektiven Verkehr. Abschnitt D.2 veranschaulicht die Fahrzeugenergiebilanzen nach einer Optimierung, die drei verschiedene Energiebedarfsklassen berücksichtigt.

## D.1. Energiebilanzen nach Optimierung der Ladestellenanordnung für den kollektiven Verkehr

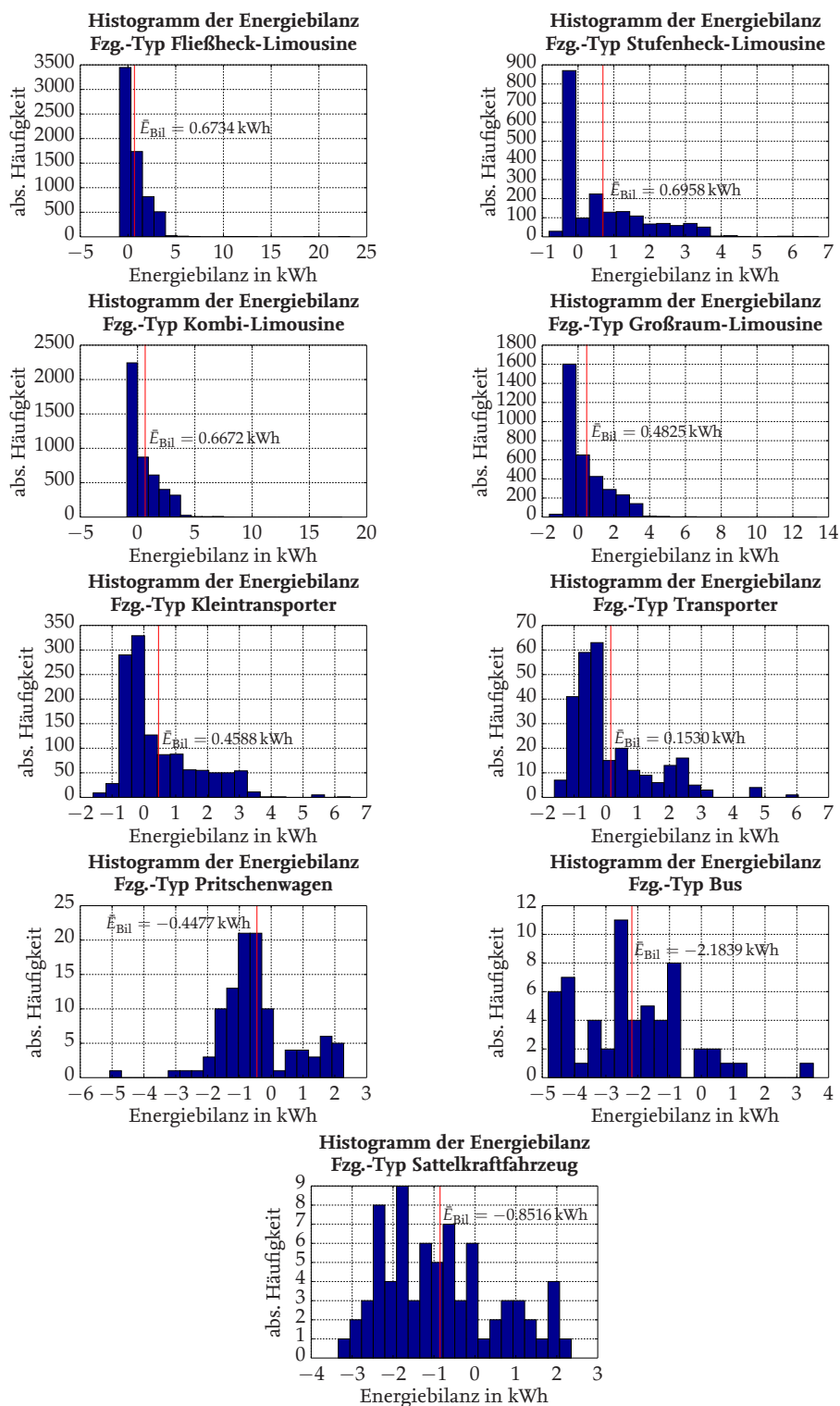


Abbildung D.1.: Histogramme der Energiebilanz eingeführter Fahrzeugtypen nach Optimierung der Ladestellenanordnung für den kollektiven Verkehr

## D.2. Energiebilanzen nach Optimierung der Ladestellenanordnung für drei Energiebedarfsklassen

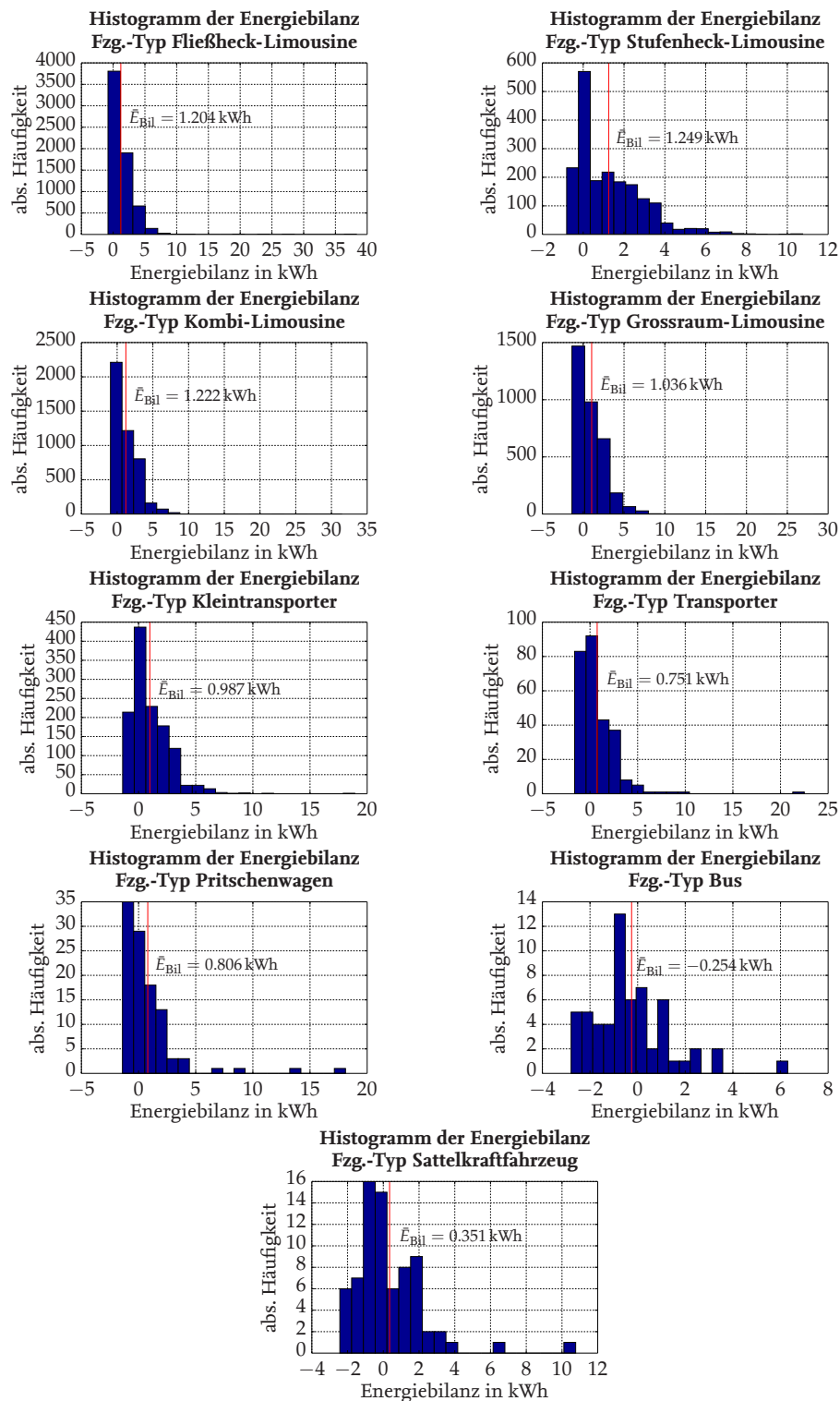


Abbildung D.2.: Histogramme der Energiebilanz eingeführter Fahrzeugtypen nach Optimierung der Ladestellenanordnung unter Berücksichtigung von drei Energiebedarfsklassen

# Literaturverzeichnis

- Abrahamsson, T. (1998). Estimation of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts – A Literature Survey. In *Interim Report IR98-021, International Institute for Applied System Analysis, Laxenburg*. Computer Science Press.
- Ahmed, K. I. (1999). *Modelling Drivers' Acceleration and Lane-Changing Behavior*. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology.
- Antoniou, C., Ben-Akiva, M., und Koutsopoulos, H. N. (2006). Dynamic traffic demand prediction using conventional and emerging data sources. *IEEE Proceedings - Intelligent Transport Systems*, 153(1):97–104.
- Apel, A. und Mitschke, M. (1997). Adjusting vehicle characteristics by means of driver models. *International Journal of Vehicle Design*, 18(6).
- Armaroli, N. und Balzani, V. (2011). Towards an electricity-powered world. *Energy and Environmental Science*, 4:3193–3222.
- Balinski, M. L. und Wolfe, P. (1963). On Benders decomposition and a plant location problem. *Mathematica Working Paper*, ARO-27.
- Barak, V. (2013). *Systemmigration: Strategien für die Informatik*. Wirtschaftsinformatik. Deutscher Universitätsverlag.
- Barceló, J. und Casanovas, J. (1984). A heuristic lagrangean algorithm for the capacitated plant location problem. *European Journal of Operational Research*, 15(2):212–226.
- Bazaraa, M. S., Jarvis, J. J., und Sherali, H. D. (2011). *Linear Programming and Network Flows*. Wiley.
- BDEW (2015). BDEW aktualisiert Angaben zum Erzeugungsmix 2014: Erneuerbare Energien erzeugen mehr Strom. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. <https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20150306-pi-erneuerbare-energien-erzeugen-mehr-strom-de> [Zugriff: 2015-12-09].
- Behrisch, M., Bieker, L., Krajzewicz, D., Erdmann, J., und Wagner, P. (2015). SourceForge: Simulation of Urban MObility. <https://sourceforge.net/projects/sumo/> [Zugriff: 2015-12-11].
- Bell, M. (1991). The estimation of origin-destination matrices by constrained generalized least squares. *Transportation Research Part B: Methodological*, 25(1):13–22.
- Ben-Akiva, M. und Bierlaire, M. (1999). *Handbook of Transportation Science*, chapter Discrete Choice Methods and their Applications to Short Term Travel Decisions, pages 5–33. Springer US, Boston, MA.

- Ben-Akiva, M., Bierlaire, M., Bottom, J., Koutsopoulos, H. N., und Mishalani, R. (1997). Development of a route guidance generation system for real-time application. In *Proceedings of the 8th IFAC Symposium on Transportation Systems*, Chania, Creta, Greece.
- Ben-Akiva, M., Bierlaire, M., Koutsopoulos, H. N., und Mishalani, R. (1998). DynaMIT: A Simulation-based System for Traffic Prediction and Guidance Generation. In *Proceedings of the DACCORD Short-term forecasting workshop*, Delft, The Netherland.
- Berman, O., Bertsimas, D., und Larson, R. C. (1995). Locating Discretionary Service Facilities, II: Maximizing Market size, Minimizing Inconvenience. *Operations Research*, 43(4):623–632.
- Berman, O., Larson, R. C., und Fouska, N. (1992). Optimal Location of Discretionary Service Facilities. *Transportation Science*, 26(3):201–211.
- Berthold, K., Kunith, A., Gratzfeld, P., und Göhlich, D. (2015). Planung und Optimierung der Ladeinfrastruktur für E-Stadtbusse. *Der Nahverkehr*, 33(7–8):16–20.
- BMVI (2014). *Verkehr in Zahlen 2014/2015*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin/Bonn.
- BMWi (2015). Erneuerbare Energien im Jahr 2014: Erste Daten zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland auf Grundlage der Angaben der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik.
- Boulter, P., McCrae, I., Joumard, R., André, M., Keller, M., Sturm, P., Hausberger, S., und Ali (2007). *ARTEMIS - Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems: Final Report*. TRL Limited.
- Brackstone, M. und McDonald, M. (1994). Validity of microscopic modelling of motorway traffic. In *Proceedings of the Intelligent Vehicles '94 Symposium*, pages 576–581. IEEE.
- Brackstone, M. und McDonald, M. (1999). Car-following: A historical Review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2(4):181–196.
- Brockfeld, E., Kelpin, R., und Wagner, P. (2004a). Performance of car following behaviour in microscopic traffic flow models. In Möhlenbrink, W., Englmann, F. C., Friedrich, M., Martin, U., und Hangleiter, U., editors, *2nd International Symposium „Networks for Mobility“*, pages 43–43. Universität Stuttgart.
- Brockfeld, E., Kühne, R., und Wagner, P. (2004b). Calibration and validation of microscopic traffic flow models. In Board, T. R., editor, *Transportation Research Board, 83rd Annual Meeting*, volume 1876, pages 62–70.
- Bundesrepublik Deutschland (2001). Luftreinhaltepläne, Pläne für kurzfristig zu ergreifende Maßnahmen, Landesverordnungen.
- Bundesrepublik Deutschland (2006). Verordnung zur Kennzeichnung der Kraftfahrzeuge mit geringem Beitrag zur Schadstoffbelastung.

- Buttelmann, M. und Lohmann, B. (2004). Optimierung mit Genetischen Algorithmen und eine Anwendung zur Modellreduktion (Optimization with Genetic Algorithms and an Application for Model Reduction). *at - Automatisierungstechnik*, 52(4-2004):151–163.
- Cascetta, E. (1984). Estimation of trip matrices from traffic counts and survey data: a generalized least squares estimator. *Transportation Research Part B: Methodological*, 18(4):289–299.
- Çetin, N. (2005). *Large-scale parallel graph-based simulations*. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Cetin, N., Burri, A., und Nagel, K. (2003). A large-scale agent-based traffic microsimulation based on queue model. In *Proceedings of the Swiss Transport Research Conference (STRC)*.
- Cetin, N., Nagel, K., Raney, B., und Völlmy, A. (2002). Large-scale Multi-agent Transportation Simulations. *Computer Physics Communications*, 147(1–2):559–564.
- Chandler, R. E., Herman, R., und Montroll, E. W. (1958). Traffic Dynamics: Studies in Car Following. *Operations Research*, 6(2):165–184.
- Chen, L. und Shaw, L. L. (2014). Recent advances in lithium–sulfur batteries. *Journal of Power Sources*, 267:770 – 783.
- Chu, L., Liu, H. X., Oh, J.-S., und Recker, W. (2003). A calibration procedure for microscopic traffic simulation. In *Proceedings of the Intelligent Transportation Systems, 2003. Proceedings. 2003 IEEE*, volume 2, pages 1574–1579. IEEE, IEEE.
- Church, R. und ReVelle, C. (1974). The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association*, 32(1):101–118.
- Church, R. L. und Meadows, M. E. (1979). Location Modeling Utilizing Maximum Service Distance Criteria. *Geographical Analysis*, 11(4):358–373.
- Cook, S. A. (1971). The Complexity of Theorem-proving Procedures. In *Proceedings of the Third Annual ACM Symposium on Theory of Computing, STOC '71*, pages 151–158, New York, NY, USA. ACM.
- Cordes, R. (2016). Große Cw-Werte-Sammlung von Autos. <http://rc.opelgt.org/indexcw.php> [Zugriff: 2016-09-17].
- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., und Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms, Third Edition*. The MIT Press, 3rd edition edition.
- Cremer, M. und Ludwig, J. (1986). A fast simulation model for traffic flow on the basis of boolean operations. *Mathematics and Computers in Simulation (MATCOM)*, 28(4):297–303.
- Dahms, F. (2015). How the simplex method works. [http://fdahms.com/2015/01/16/how\\_the\\_simplex\\_works/](http://fdahms.com/2015/01/16/how_the_simplex_works/) [Zugriff: 2016-02-10].
- Dallmeyer, J. (2014). *Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt*. Springer Science + Business Media.



- Dantzig, G. B. (1951). Maximization of a linear function of variables subject to linear inequalities. In *Activity Analysis of Production and Allocation*, Cowles Commission Monograph No. 13, pages 339–347. John Wiley & Sons, Inc., New York, N. Y.; Chapman & Hall, Ltd., London.
- Dantzig, G. B. (1990). A History of Scientific Computing. chapter Origins of the Simplex Method, pages 141–151. ACM, New York, NY, USA.
- Detering, S. (2011). *Kalibrierung und Validierung von Verkehrssimulationsmodellen zur Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Deutsch, V., Hilpert-Janßen, T., und Kiel, T. (2015). EmoG – Freigabemöglichkeit von Busspuren für private Elektroautos, Technischer Entscheidungsleitfaden als Arbeitshilfe für zuständige Behörden. Leitfaden, Deutscher Städtetag, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V.
- Diekamp, R. (1995). *Entwicklung eines fahrzeugorientierten Verkehrsflusssimulationsprogramms*. Dissertation, Aachen, Deutschland.
- Dietrich, T.-H., Loeffler, C., Meins, J., Henke, M., Wussow, J., Engel, B., Kurczveil, T., und Callegari, J. (2016). Conceptual design and integration of a high power inductive charging system into a series vehicle. In Henke, M. und Voß, B., editors, 13. *Symposium: Hybrid- und Elektrofahrzeuge*, pages 122–134, Braunschweig. ITS Niedersachsen e. V.
- Dijkstra, E. W. (1959). A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1):269–271.
- DLR (2006). SUMO: TraCI. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik. <http://sumo.dlr.de/wiki/TraCI> [Zugriff: 2016-03-08].
- DLR (2008). SUMO: DUAROUTER. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Institut für Verkehrssystemtechnik. <http://sumo.dlr.de/wiki/DUAROUTER> [Zugriff: 2016-05-26].
- DLR (2009a). SUMO: Contributed/Cadyts. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Institut für Verkehrssystemtechnik. <http://sumo.dlr.de/wiki/Contributed/Cadyts> [Zugriff: 2016-05-26].
- DLR (2009b). SUMO: Models/Emissions/HBEFA-based. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik. <http://www.sumo.dlr.de/wiki/Models/Emissions/HBEFA-based> [Zugriff: 2016-03-18].
- DLR (2009c). SUMO: Simulation/Output/Lane- or Edge-based Noise Measures. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Institut für Verkehrssystemtechnik. [http://sumo.dlr.de/wiki/Simulation/Output/Lane-\\_or\\_Edge-based\\_Noise\\_Measures](http://sumo.dlr.de/wiki/Simulation/Output/Lane-_or_Edge-based_Noise_Measures) [Zugriff: 2016-11-23].
- DLR (2009d). SUMO: Simulation/Public Transport. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik. [http://sumo.dlr.de/wiki/Simulation/Public\\_Transport](http://sumo.dlr.de/wiki/Simulation/Public_Transport) [Zugriff: 2016-03-08].
- DLR (2009e). SUMO: Simulation/Traffic Lights. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik. [http://sumo.dlr.de/wiki/Simulation/Traffic\\_Lights](http://sumo.dlr.de/wiki/Simulation/Traffic_Lights) [Zugriff: 2016-03-08].

- DLR (2010). SUMO: Demand/Activity-based Demand Generation. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik. [http://sumo.dlr.de/wiki/Demand/Activity-based\\_Demand\\_Generation](http://sumo.dlr.de/wiki/Demand/Activity-based_Demand_Generation) [Zugriff: 2016-04-15].
- DLR (2011a). SUMO: Definition of Vehicles, Vehicle Types, and Routes. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik. [http://sumo.dlr.de/wiki/Definition\\_of\\_Vehicles,\\_Vehicle\\_Types,\\_and\\_Routes](http://sumo.dlr.de/wiki/Definition_of_Vehicles,_Vehicle_Types,_and_Routes) [Zugriff: 2016-03-08].
- DLR (2011b). SUMO: Networks/Building Networks from own XML-descriptions. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik. [http://sumo.dlr.de/wiki/Networks/Building\\_Networks\\_from\\_own\\_XML-descriptions](http://sumo.dlr.de/wiki/Networks/Building_Networks_from_own_XML-descriptions) [Zugriff: 2016-03-08].
- DLR (2015). SUMO: Models/Electric. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Institut für Verkehrssystemtechnik. <http://sumo.dlr.de/wiki/Models/Electric> [Zugriff: 2016-11-23].
- DLR (2016). SUMO, Simulation and Modeling. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik. <https://software.dlr.de/p/sumo/home/> [Zugriff: 2015-11-01].
- Dowling, R., Skabardonis, A., und Alexiadis, V. (2004). *Traffic Analysis Toolbox: Guidelines for applying traffic microsimulation modeling software*, volume III of *Traffic Analysis Toolbox*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Research, Development, and Technology.
- Drieschner, F. (2013). Das politische Auto. *Die Zeit*. Ausgabe vom 01. August 2013.
- Ehrenstein, C. (2013). EU-Grenzwerte lassen deutsche Städte verzweifeln. <http://www.welt.de/politik/deutschland/article114761731/EU-Grenzwerte-lassen-deutsche-Staedte-verzweifeln.html> [Zugriff: 2015-10-29].
- Erdmann, J. (2015). *Modeling Mobility with Open Data: 2nd SUMO Conference 2014 Berlin, Germany, May 15-16, 2014*, chapter SUMO's Lane-Changing Model, pages 105–123. *Lecture Notes in Mobility*. Springer International Publishing, Cham.
- Erdmann, J. und Kajzewicz, D. (2014). *Simulation of Urban Mobility: First International Conference, SUMO 2013, Berlin, Germany, May 15-17, 2013. Revised Selected Papers*, chapter SUMO's Road Intersection Model, pages 3–17. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Europäische Kommission (2002). Richtlinie 2002/49/EG der Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm.
- Europäische Kommission (2007). Verordnung 2007/715/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge.
- Fellendorf, M. und Vortisch, P. (2001). Validation of the microscopic traffic flow model vissim in different real-world situations. In Board, T. R., editor, *Transportation Research Board, 80th Annual Meeting*.

- FGSV (2001). *HBS: Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen*. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, e. V., Kommission: Bemessung von Straßenverkehrsanlagen, FGSV Verlag GmbH.
- FGSV (2006). *Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation: Grundlagen und Anwendung*. Trapp, R.; Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, e. V., Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, FGSV Verlag GmbH.
- fka (2004). PELOPS White Paper. Technical report, fka, Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, Aachen, Deutschland.
- fka (2016). PELOPS. Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen. [www.pelops.de](http://www.pelops.de) [Zugriff: 2016-03-31].
- Flötteröd, G. (2009). Cadyts – a free calibration tool for dynamic traffic simulations. In *Proceedings of the 9th Swiss Transport Research Conference*, Ascona, Schweiz.
- Flötteröd, G., Chen, Y., und Nagel, K. (2012). Behavioral calibration and analysis of a large-scale travel microsimulation. *Networks and Spatial Economics*, 12(4):481–502.
- Follmer, R., Gruschwitz, D., Jesske, B., Quandt, S., Lenz, B., Nobis, C., Köhler, K., und Mehlin, M. (2010). *Mobilität in Deutschland 2008 (FE-Nr. 70.801/2006)*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin/Bonn.
- Follmer, R., Kunert, U., Kloas, J., und Kuhfeld, H. (2003). *Mobilität in Deutschland 2002 (FE-Nr. 70.736/2003)*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin/Bonn.
- Forinash, C. V. und Koppelman, F. S. (1993). Application and interpretation of nested logit models of intercity mode choice. *Transportation Research Record No. 1413, Innovations in Travel Behavior Analysis, Demand Forecasting, and Modeling Networks.*, pages 98–106.
- Frade, I., Ribeiro, A., Antunes, A. P., und Gonçalves, G. (2011a). An optimization model for locating electric vehicle charging stations in central urban areas. In *Transportation Research Board, 90th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA. Transportation Research Board.
- Frade, I., Ribeiro, A., Gonçalves, G., und Antunes, A. (2011b). Optimal Location of Charging Stations for Electric Vehicles in a Neighborhood in Lisbon, Portugal. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2252:91–98.
- Frank, M. und Wolfe, P. (1956). An algorithm for quadratic programming. *Naval Research Logistics Quarterly*, 3(1-2):95–110.
- Friedrich, B. (2014). Koordinierung von Lichtsignalanlagen in städtischen Straßennetzen. *Straßenverkehrstechnik*, 58(4).
- Fritzsche, H. T. (1994). A model for traffic simulation. *Traffic Engineering and Control*, 35(5):317–321.
- Gawron, C. (1998a). An iterative algorithm to determine the dynamic user equilibrium in a traffic simulation model. *International Journal of Modern Physics C*, 9(3):393–407.

- Gawron, C. (1998b). *Simulation-Based Traffic Assignment – Computing User Equilibria in Large Street Networks*. Dissertation, Universität zu Köln.
- Gazis, D. C., Herman, R., und Rothery, R. W. (1961). Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow. *Operations research*, 9(4):545–567.
- Gerigk, P., Bruhn, D., und Danner, D. (2005). *Kraftfahrzeugtechnik*. Westermann, Braunschweig.
- Gipps, P. G. (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15(2):105–111.
- Gipps, P. G. (1986). A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 20(5):403–414.
- Goodchild, . F. und Noronha, V. T. (1987). Location-allocation and impulsive shopping: the case of gasoline retailing. In Ghosh, A. und Rushton, G., editors, *Spatial analysis and location-allocation models*, pages 121–136. van Nostrand Reinhold, New York.
- Google Inc. (2016). Google Maps. <https://www.google.de/maps/> [Zugriff: 2016-08-16].
- Greene, W., Hensher, D., und Rose, J. (2006). Accounting for heterogeneity in the variance of unobserved effects in mixed logit models. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(1):75–92.
- Grether, D. S. (2014). *Extension of a Multi-Agent Transport Simulation for Traffic Signal Control and Air Transport Systems*. PhD thesis, TU Berlin, Berlin.
- Griva, I., Nash, S. G., und Sofer, A. (2008). *Linear and Nonlinear Optimization* (2. ed.). SIAM.
- Grötschel, M. und Holland, O. (1991). Solution of large-scale travelling salesman problems. *Mathematical Programming*, 51(2):141–202.
- Hafstein, S. F., Chrobok, R., Pottmeier, A., Schreckenberg, M., und Mazur, F. (2004). A High-Resolution Cellular Automata Traffic Simulation Model with Application in a Freeway Traffic Information System. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 19(5):338–350.
- Hajimiragha, A. H., Canizares, C. A., Fowler, M. W., Moazeni, S., und Elkamel, A. (2011). A Robust Optimization Approach for Planning the Transition to Plug-in Hybrid Electric Vehicles. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 26(4):2264–2274.
- Hakimi, S. L. (1964). Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph. *Operations Research*, 12(3):450–459.
- Hart, P. E., Nilsson, N. J., und Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems, Science, and Cybernetics*, SSC-4(2):100–107.
- Hartung, J., Elpelt, B., und Klösener, K. H. (2005). *Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. Oldenbourg.
- Hautzinger, H., Stock, W., Mayer, K., Schmidt, J., und Heidemann, D. (2005). *Fahrleistungserhebung 2002 – Inländerfahrleistung (FE-Nr. 82.201/2001)*, volume V 120 of *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Bundesanstalt für Straßenwesen.

- Helbing, D. (1997). *Verkehrsdynamik: Neue physikalische Modellierungskonzepte*. Springer Berlin Heidelberg.
- Henze, R. (2004). *Beurteilung von Fahrzeugen mit Hilfe eines Fahrermodells*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Hodgson, M. J. (1990). A Flow-Capturing Location-Allocation Model. *Geographical Analysis*, 22(3):270–279.
- Holland, J. H. (1975). Adaptation in natural and artificial systems.
- Hourdakis, J., Michalopoulos, P. G., und Kottommannil, J. (2002). A practical procedure for calibrating microscopic traffic simulation models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1852):130–139.
- Hunt, J. G. und Lyons, G. D. (1994). Modelling a dual-carriageway lane changing using neural networks. *Transportation Research Part C*, 2(4):231–245.
- ICNIRP (1998). Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. *Health Physics*, 74(4):494–522.
- IEA (2008). Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency – Key Insights from IEA Indicator Analysis. International Energy Agency.
- IEA (2014). Key World Energy Statistics. International Energy Agency.
- ika, RWTH Aachen (2015). SLAM — Schnellladenetz für Achsen und Metropolen. Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen. <http://www.slam-projekt.de> [Zugriff: 2016-06-09].
- ITS Lab (2016). MITSIMLab. Intelligent Transportation System Lab, Massachusetts Institute of Technology. <https://its.mit.edu/software/mitsimlab> [Zugriff: 2016-03-31].
- Kachiyan, L. (1979). A polynomial algorithm in linear programming. *Soviet Mathematics Doklady*, 20:191–194.
- Karmarkar, N. (1984). A New Polynomial-Time Algorithm for Linear Programming. In DeMillo, R. A., editor, *Proceedings of the 16th Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, pages 302–311. ACM.
- Keller, M. (2014). *Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs: Version 3.2*. Umweltbundesamt - Forschungsbericht.
- Keller, M., de Haan, P., W., K., Hausberger, S., und Steven, H. (2004). *Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs: Version 2.1*. Umweltbundesamt - Forschungsbericht.
- Kelley, J. E. J. (1960). The Cutting-Plane Method for Solving Convex Programs. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 8(4):703–712.
- Kesting, A. (2008). *Microscopic Modeling of Human and Automated Driving: Towards Traffic-Adaptive Cruise Control*. Verlag Dr. Müller, neuerscheinung edition.



- Kesting, A., Treiber, M., und Helbing, D. (2010a). Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1928):4585–4605.
- Kesting, A., Treiber, M., und Helbing, D. (2010b). Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1928):4585–4605.
- Kesting, A., Treiber, M., Schönhof, M., und Helbing, D. (2008). Adaptive cruise control design for active congestion avoidance. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(6):668–683.
- Kieckhäfer, K. (2013). *Marktsimulation zur strategischen Planung von Produktportfolios: Dargestellt am Beispiel innovativer Antriebe in der Automobilindustrie*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Kilimann, S. (2010). Über Brücken in die Zukunft. *Süddeutsche Zeitung*. Ausgabe vom 18. September 2010.
- Kirchhoff, P. (2002). *Städtische Verkehrsplanung: Konzepte, Verfahren, Maßnahmen*. Teubner Verlag.
- Klose, A. (2013). *Standortplanung in distributiven Systemen: Modelle, Methoden, Anwendungen*. Betriebswirtschaftliche Studien. Physica-Verlag HD.
- Kometani, E. und Sasaki, T. (1958). On the stability of traffic flow. *Journal of Operations Research Japan*, 2(1):11–26.
- Korte, B. und Vygen, J. (2012). *Kombinatorische Optimierung. Theorie und Algorithmen*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2013). *Verkehrs Deutsche Lastkraftfahrzeuge – Güterbeförderung Jahr 2012*. Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamtes VD 4. Kraftfahrtbundesamt.
- Krajzewicz, D. (2009). *Fahrermodellierung in Wissenschaft und Wirtschaft*, chapter Kombination von taktischen und strategischen Einflüssen in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation, pages 104–115. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M., und Bieker, L. (2012). Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. *International Journal on Advances in Systems and Measurements*, 5(3&4):128–138.
- Krauß, S. (1998). *Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics*. Dissertation, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
- Krauß, S., Wagner, P., und Gawron, C. (1997). Metastable states in a microscopic model of traffic flow. *Physical Review E*, 55:5597–5602.
- Krzizek, R. (2009). *Umweltzone Ruhrgebiet*. Ruhr-Forschungsinstitut für Innovations- und Strukturpolitik. Brockmeyer.
- Kuby, M. und Lim, S. (2005). The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles. *Socio-Economic Planning Sciences*, 39(2):125–145.



- Kuby, M. und Lim, S. (2006). Location of Alternative-Fuel Stations Using the Flow-Refueling Location Model and Dispersion of Candidate Sites on Arcs. *Networks and Spatial Economics*, 7(2):129–152.
- Kuby, M., Lim, S., und Upchurch, C. (2005). Dispersion of nodes added to a network. *Geographical Analysis*, 37(4):383–409.
- Kuehn, A. A. und Hamburger, M. J. (1963). A Heuristic Program for Locating Warehouses. *Management Science*, 9(4):643–666.
- Kunith, A., Göhlich, D., und Mendelevitch, R. (2014). Planning and optimization of a fast-charging infrastructure for electric urban bus systems. In Cokorilo, O., editor, *The Second International Conference on Traffic and Transport Engineering*, pages 43–50, Belgrad. City Net Scientific Research Center Ltd.
- Kunz, J. (2012). *Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, Ausgabe 2012 (TLS 2012)*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- Kurczveil, T. (2015). Energy transfer for electric traffic. In *5th International Electric Drives Production Conference – EDPC 2015*, pages 1–5.
- Kurczveil, T. und López, P. A. (2015). eNetEditor: Rapid prototyping urban traffic scenarios for SUMO and evaluating their energy consumption. In *Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik: SUMO 2015 – Intermodal Simulation for Intermodal Transport*, volume 28, pages 137–160, Berlin. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik.
- Kurczveil, T., López, P. A., und Schnieder, E. (2014). *Simulation of Urban Mobility: First International Conference, SUMO 2013, Berlin, Germany, May 15-17, 2013. Revised Selected Papers*, chapter Implementation of an Energy Model and a Charging Infrastructure in SUMO, pages 33–43. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Kurczveil, T. und Schnieder, E. (2014). Messdatenauswertung für die Auslegung einer induktiven Ladeinfrastruktur für den öffentlichen Personennahverkehr in Braunschweig. In Lemmer, K., editor, *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel 2014*, pages 236–256, Braunschweig. ITS Niedersachsen e.V.
- Land, A. H. und Doig, A. G. (1960). An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems. *Econometrica*, 28(3):497.
- LeBlanc, L. J. und Farhangian, K. (1982). Selection of a trip table which reproduces observed link flows. *Transportation Research Part B: Methodological*, 16(2):83–88.
- Leonard, D. R., Gower, P., und Taylor, N. B. (1989). *CONTRAM: Structure of the Model*. Research report (Transport and Road Research Laboratory). Traffic Safety Division, Traffic Group, Transport and Road Research Laboratory.
- Leutzbach, W. (1988). *Introduction to the Theory of Traffic Flow (Extended and totally revised English language version of: Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses)*. Springer.

- Levin, L. A. (1973). Universal sequential search problems. *Problemy Peredachi Informatsii*, 9(3):115–116.
- Li, J., van Zuylen, H. J., Chen, Y., Viti, F., und Wilmink, I. R. (2009). Optimizing traffic control for emission reduction: the calibration of the simulation model. In *Proceedings of the Seminar mobil.TUM, International Scientific Conference on Mobility and Transport – ITS for larger Cities*. Technische Universität München.
- Lighthill, M. J. und Whitham, G. B. (1955). On Kinematic Waves II: A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 229(1178):317–345.
- Linssen, J. (2012). *Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen - Advances in Systems Analyses 1*. Number Bd. 1 in Schriften des Forschungszentrums Jülich / Reihe Energie & Umwelt: Reihe Energie & Umwelt. Forschungszentrum Jülich, Zentralbibliothek.
- Liu, Z., Wen, F., und Ledwich, G. (2013). Optimal Planning of Electric-Vehicle Charging Stations in Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(1):102–110.
- Lämmer, S. (2016). Selbst-gesteuerte Lichtsignalanlagen im Praxistest. *Straßenverkehrstechnik*, pages 143–152.
- Lämmer, S., Krimmling, J., und Hoppe, A. (2009). Selbst-Steuerung von Lichtsignalanlagen - Regelungstechnischer Ansatz und Simulation. *Straßenverkehrstechnik*, pages 714–721.
- Lohse, D. und Schnabel, W. (2011). *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung: Band 2 - Verkehrsplanung*. Beuth Studium. Beuth Verlag GmbH.
- Maher, M. J. (1983). Inferences on trip matrices from observations on link volumes: A Bayesian statistical approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 17(6):435–447.
- Mahmassani, H. S., Hu, T.-Y., und Jayakrishnan, R. (1995). *Urban Traffic Networks: Dynamic Flow Modeling and Control*, chapter Dynamic Traffic Assignment and Simulation for Advanced Network Informatics (DYNASMART). Springer Verlag.
- Maia, R., Silva, M., Araujo, R., und Nunes, U. (2011). Electric vehicle simulator for energy consumption studies in electric mobility systems. In *2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems*, pages 227–232, Wien. IEEE.
- Mandel, B., Gaudry, M., und Rothengatter, W. (1997). A disaggregate Box-Cox Logit mode choice model of intercity passenger travel in Germany and its implications for high-speed rail demand forecasts. *The Annals of Regional Science*, 31(2):99–120.
- Manne, A. S. (1964). Plant Location Under Economies-of-Scale—Decentralization and Computation. *Management Science*, 11(2):213–235.
- Maric, M. (2010). An Efficient Genetic Algorithm for Solving the Multi-Level Uncapacitated Facility Location Problem. *Computing and Informatics*, 29(2):183–201.

- MATSim Community (2016). MultiAgent Transport Simulation. <http://www.matsim.org> [Zugriff: 2016-03-11].
- McFadden, D. (1974). Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior. In Zarembka, P., editor, *Frontiers in Econometrics*, pages 105–142. Academic Press, New York.
- Mehrotra, S. (1992). On the implementation of a primal-dual interior point method. *SIAM Journal on Optimization*, 2(4):575–601.
- Meins, J. und Graffam, C. (2011). Induktive Energieübertragung für Elektrobusse nutzen - Ein Mosaikstein in der Elektromobilität wird in Braunschweig erprobt. *Der Nahverkehr*, (9):18ff.
- Meins, J., Soyck, F., Engel, B., Kurczveil, T., und Schnieder, E. (2014). Application of high-power inductive charging of electric buses in schedules line service. In Henke, M. und Voß, B., editors, 11. *Symposium: Hybrid- und Elektrofahrzeuge*, pages 148–170, Braunschweig. ITS Niedersachsen e.V.
- Miska, M. P., Muller, T. H. J., und van Zuylen, H. J. (2006a). Calibrating driving behavior with microscopic measurement data. In 2006 *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, pages 1609–1614. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).
- Miska, M. P., Muller, T. H. J., und van Zuylen, H. J. (2006b). Calibrating driving behavior with microscopic measurement data. In 2006 *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, pages 1609–1614.
- Mitschke, M. (2013). *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Springer Berlin Heidelberg.
- Müller, W., Bischof, W., Korda, M., Braun, B., Habermehl, K., Münch, H., Storm, W., und Weckwerth, H. (2013). *Städtebau*. Vieweg+Teubner Verlag.
- Müller-Hellmann, A. (2013). Batteriebusse ante portas!? Zeit ist reif für Start der Ablösung von Diesel- durch Elektrobusse. *Der Nahverkehr*, 5:21 ff.
- Nagel, K. und Schreckenberg, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 2(12):2221–2229.
- Nelson, P. (1995). A kinetic model of vehicular traffic and its associated bimodal equilibrium solutions. *Transport Theory and Statistical Physics*, 24(1-3):383–408.
- Nemhauser, G. L. und Wolsey, L. A. (1988). *Integer and Combinatorial Optimization*. Wiley-Interscience, New York, NY, USA.
- Newell, A. (1990). *Unified Theories of Cognition*. Harvard University Press, Cambridge, MA, USA.
- Nickel, S., Stein, O., und Waldmann, K. H. (2014). *Operations Research*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg.
- Obrenovic, M. (2009). *Methodik für die Migration von Systemen der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik am Beispiel der Einführung von ETCS*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Olstam, J. J. und Tapani, A. (2004). Comparison of Car-following models. Technical Report Projects 40503, 40485; VTI meddelande 960A, Swedish National Road and Transport Research Institute, SE-581 95 Linköping, Schweden.

- OpenStreetMap Foundation (2016). OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org/> [Zugriff: 2016-08-16].
- Ossen, S. und Hoogendoorn, S. (2008). Calibrating car-following models using microscopic trajectory data. *A Report Submitted on a critical Analysis of both microscopic Trajectory Data Collection Methods, and Calibration Studies based on these Data*.
- Ottmann, T. und Widmayer, P. (2012). *Algorithmen und Datenstrukturen*, 5. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag.
- Pachl, J. (2008). *Systemtechnik des Schienenverkehrs: Bahnbetrieb planen, steuern und sichern*. Vieweg + Teubner.
- Padberg, M. und Rinaldi, G. (1991). A Branch-and-cut Algorithm for the Resolution of Large-scale Symmetric Traveling Salesman Problems. *Society for Industrial and Applied Mathematics Review*, 33(1):60–100.
- Palm, I., Regniet, G., und Schmidt, G. (1996). *Ermittlung der PKW- und Nfz-Jahresfahrleistungen 1993 auf allen Straßen in der Bundesrepublik Deutschland (FE-Nr. 90434/94)*. Heusch - Boesefeldt, Beratende Ingenieure für Verkehrstechnik und Datenverarbeitung.
- Papadimitriou, C. H. (1981). On the Complexity of Integer Programming. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 28(4):765–768.
- Papaleontiou, L. G. (2008). High-Level Traffic Modelling and Generation. Master these, University of Cyprus, Nikosia, Griechenland.
- Papatzikou, E. (2006). Evaluation of microsimulation models through vehicle tracking. Master thesis, University of Leeds.
- Parry, K. und Hazelton, M. L. (2012). Estimation of origin–destination matrices from link counts and sporadic routing data. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(1):175–188.
- Pipes, L. A. (1953). An Operational Analysis of Traffic Dynamics. *Journal of Applied Physics*, 24(3):274–281.
- Pitney Bowes Software (2016). Quadstone Paramics. <http://www.paramics-online.com/> [Zugriff: 2016-03-31].
- Pohlheim, H. (2013). *Evolutionäre Algorithmen: Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis*. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg.
- PTV (2011). VISSIM 5.40 Benutzerhandbuch. PTV Planung Transport Verkehr AG / PTV Group.
- PTV (2016a). PTV Vissim. PTV Planung Transport Verkehr AG / PTV Group: <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/> [Zugriff: 2016-03-11].
- PTV (2016b). PTV Visum. PTV Planung Transport Verkehr AG / PTV Group: <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-visum/> [Zugriff: 2016-03-11].

- Pucher, E., Vana, V., und Cachón, L. (2010). Analytischer Vergleich von hybriden Antriebssystemen mittels Real-world validierter Simulationsmodelle.
- Punzo, V. und Simonelli, F. (2005). Analysis and comparison of microscopic traffic flow models with real traffic microscopic data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1937:53–63.
- Pütz, R. (2012). *Einführung in die Linienbustchnik*. VDV-Akademie: ÖPNV-Wissen. Alba.
- Quaschnig, V. (2013). *Regenerative Energiesysteme. Technologie – Berechnung – Simulation*. Hanser, München, 8. aktualisierte auflage edition.
- Rakha, H. A. und van Aerde, M. (1996). Comparison of Simulation Modules of TRANSYT and INTEGRATION Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1566).
- RalfZ (2006). OpenStreetMap: Attributierung von Straßen in Deutschland. OpenStreetMap. [http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Attributierung\\_von\\_Straßen\\_in\\_Deutschland](http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Attributierung_von_Straßen_in_Deutschland) [Zugriff: 2016-02-27].
- Ran, B. und Boyce, D. E. (1996). *Modeling dynamic transportation networks: an intelligent transportation systems oriented approach*. Springer, 2. auflage edition.
- Ranjitkar, P., Nakatsuji, T., und Asano, M. (2004). Performance evaluation of microscopic traffic flow models with test track data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1876:90–100.
- Ranjitkar, P., Nakatsuji, T., und Kawamua, A. (2005). Car-following models: An experiment based benchmarking. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6:1582–1596.
- Rechenberg, I. (1973). *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Frommann-Holzboog.
- Reuschel, A. (1950). Fahrzeugbewegungen in der Kolonne bei gleichförmig beschleunigtem oder verzögertem Leitfahrzeug. *Zeitschrift des Österreichischen Ingenieur- und Architekturvereines*, 95:59–73.
- Richards, P. I. (1956). Shock Waves on the Highway. *Operations Research*, 4(1):42–51.
- Robert Bosch GmbH, editor (2002). *Autoelektrik, Autoelektronik*. Vieweg.
- Rohde, J. (2007). OptiV - Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr, Fallbeispiel 1: Schätzung von Herkunfts-/Zielbeziehungen. <http://www.optiv.de/index.html> [Zugriff: 2016-03-31].
- Rosenbloom, P. S. und Newell, A. (1988). An Integrated Computational Model of Stimulus-Response Compatibility and Practice. volume 21 of *Psychology of Learning and Motivation*, pages 1 – 52. Academic Press.
- Rothery, R. W. (1992). *Revised Monograph on Traffic Flow Theory*, chapter Car Following Models, pages 4–1–4–42. Transportation Research Board and U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.



- Sächs. Umweltministerium (2015). Umgebungslärmrichtlinie. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft. <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/3509.htm> [Zugriff: 2015-11-03].
- Salomons, E., van Maercke, D., Defrance, J., und de Roo, F. (2011). The Harmonoise Sound Propagation Model. *Acta Acustica united with Acustica*, 97(1):62–74.
- Scheer, H. (2010). *Der energetische Imperativ*. Kunstmann, München.
- Schnieder, E., Becker, U., Braun, I., Busemann, A., Detering, S., Hänsel, F., May, J. C., Müller, L., Poliak, J., Schrom, H., Slovak, R., und Wegele, S. (2007). *Verkehrsleittechnik: Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs*. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg.
- Schnieder, E. und Schnieder, L. (2013). *Verkehrssicherheit: Maße und Modelle, Methoden und Maßnahmen für den Straßen- und Schienenverkehr*. Springer Vieweg.
- Schnieder, L. und Lemmer, K. (2014a). Anwendungsplattform Intelligente Mobilität – die Entwicklung intelligenter Mobilitätsdienste im realen Verkehrsumfeld. *Internationales Verkehrswesen*, 66(2):77–79.
- Schnieder, L. und Lemmer, K. (2014b). Entwicklung intelligenter Mobilitätsdienste im realen Verkehrsumfeld in der Anwendungsplattform Intelligenten Mobilität. In 13. *Fachtagung Entwurf komplexer Automatisierungssysteme (EKA)*, volume 13.
- Schoen, M. P. (2005). Intelligent optimization techniques, genetic algorithms, tabu search, simulated annealing, and neural networks, D. T. Pham and D. Karaboga, Springer: Berlin, Heidelberg, New York; Springer London: London, 2000, 302pp, ISBN 1-85233-028-7. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 15(6):287–289.
- Schöning, U. (2001). *Algorithmik*. Spektrum Akadem. Verl.
- Schreckenberg, M., Schadschneider, A., und Nagel, K. (1996). Zellularautomaten simulieren Straßenverkehr. *Physik Journal*, 52(5):460–462.
- Schrijver, A. (1986). *Theory of Linear and Integer Programming*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA.
- Schütt, H. (1990). *Entwicklung und Erprobung eines sehr schnellen, bitorientierten Verkehrssimulationssystems für Strassennetze*. Arbeitsgruppe Automatisierungstechnik: Schriftenreihe der Arbeitsgruppe Automatisierungstechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg. Technische Universität Hamburg-Harburg.
- Schwerdtfeger, T. (1986). *Makroskopisches Simulationsmodell für Schnellstraßennetze mit Berücksichtigung von Einzelfahrzeugen (DYNEMO)*. Dissertation, Uni Karlsruhe.
- Sills, B. (2011). Solar May Produce Most of World's Power by 2060, IEA Says. <http://www.bloomberg.com/news/articles/2011-08-29/solar-may-produce-most-of-world-s-power-by-2060-iea-says> [Zugriff: 2015-10-29].



- Simchi-Levi, D. und Berman, O. (1988). A Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Location Problem on Networks. *Operations Research*, 36(3):478–484.
- Sparmann, U. (1978). *Spurwechselvorgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Bundesminister für Verkehr, Abt. Strassenbau.
- Spiess, H. (1987). A maximum likelihood model for estimating origin-destination matrices. *Transportation Research Part B: Methodological*, 21(5):395–412.
- Spiess, H. (1990). *A Gradient Approach for the O-D Matrix Adjustment Problem*. Centre de recherche sur les transports - Université de Montréal.
- Stadt Braunschweig (2012). *Lärmminderungsplan der Stadt Braunschweig, Teil 1: Lärmkartierung nach der Umgebungslärmrichtlinie, Stand 2009*.
- statista (2014). Europäische Union: Urbanisierungsgrad in den Mitgliedsstaaten im Jahr 2014. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/249029/umfrage/urbanisierung-in-den-eu-laendern/> [Zugriff: 2015-11-03].
- statista (2016a). Anzahl der Neuzulassungen von Elektroautos in Deutschland in den Jahren 2003 bis 2016. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/244000/umfrage/neuzulassungenvon-elektroautos-in-deutschland/> [Zugriff: 2016-11-22].
- statista (2016b). Anzahl der Neuzulassungen von Personenkraftwagen in Deutschland im Jahr 2015 nach Marken. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/167008/umfrage/neuzulassungen-von-pkw-nach-marken-in-deutschland/> [Zugriff: 2016-11-22].
- Stauss, H.-J. (2001). *Mesoskopische Simulation des Straßenverkehrs mit telematikgestützter Zielführung*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Steierwald, G., Künne, H. D., und Vogt, W., editors (2005). *Stadtverkehrsplanung – Grundlagen, Methoden, Ziele*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Stollsteimer, J. F. (1963). A Working Model for Plant Numbers and Locations. *American Journal of Agricultural Economics*, 45(3):631–645.
- Theil, H. (1967). *Economics and information theory*. Studies in mathematical and managerial economics. North-Holland Pub. Co.
- Thiesing, G. (2010). *Umweltorientiertes Verkehrsmanagement Braunschweig Förderinitiative, Mobilität 21 - Beispiele für innovative Verkehrslösungen*.
- Todosiev, E. P. (1963). *The Action Point Model of Driver-vehicle Systems*. Dissertation, The Ohio State University, Engineering Experiment Station.
- Todosiev, E. P. und Barbosa, L. C. (1963). A proposed model for the driver vehicle system. *Traffic Engineering*, 34:17–20.
- Toledo, T. (2003). *Integrated Driving Behavior Modeling*. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology.

- Toledo, T., Koutsopoulos, H. N., und Ben-Akiva, M. (2007). Integrated driving behavior modeling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 15(2):96–112.
- Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., und Bergman, L. (1971). The Location of Emergency Service Facilities. *Operations Research*, 19(6):1363–1373.
- Torn, A. und Zilinskas, A. (1989). *Global Optimization*. Springer-Verlag New York, Inc., New York, NY, USA.
- Train, K. (1978). A validation test of a disaggregate mode choice model. *Transportation Research*, 12(3):167–174.
- Treiber, M. und Helbing, D. (2002). Realistische Mikrosimulation von Straßenverkehr mit einem einfachen Modell. In *Tagungsband des 16. Symposium Simulationstechnik (ASIM 2002)*.
- Treiber, M., Hennecke, A., und Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E*, 62:1805–1824.
- Treiber, M. und Kesting, A. (2010). *Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg.
- Treiber, M., Kesting, A., und Helbing, D. (2006). Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 360(1):71–88.
- TSS (2016). AIMSUN. TSS Transport Simulation Systems: <https://www.aimsun.com/> [Zugriff: 2016-03-11].
- Turau, V. (2009). *Algorithmische Graphentheorie*. De Gruyter Studium. Oldenbourg.
- Turing, A. M. (1936). On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2(42):230–265.
- United Nations (2012). World Population Prospects: The 2012 Revision. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- United Nations (2014). World Urbanization Prospects: The 2014 Revision. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- Upchurch, C., Kuby, M., und Lim, S. (2009). A Model for Location of Capacitated Alternative-Fuel Stations. *Geographical Analysis*, 41(1):85–106.
- van Aerde, M., Hellings, B., Baker, M., und Rakha, H. A. (1996). Integration: Overview of simulation features. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1566).
- van Maercke, D. und Defrance, J. (2007). Development of an Analytical Model for Outdoor Sound Propagation Within the Harmonoise Project. *Acta Acustica united with Acustica*, 93(2):201–212.
- van Zuylen, H. J. und Willumsen, L. G. (1980). The most likely trip matrix estimated from traffic counts. *Transportation Research Part B: Methodological*, 14(3):281–293.
- Vortisch, P. (2014). Mehr Verhalten in der Verkehrsflusssimulation. In *HEUREKA 2014*. FGVS.

- Vortisch, P., Menneni, S., und Sun, C. (2008). Kalibrierung von Fahrverhaltensparametern in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation mit Hilfe evolutionärer Algorithmen. *Straßenverkehrstechnik*, 52(5):274–279.
- Wagner, P. (2006). How human drivers control their vehicle. *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems*, 52(3):427–431.
- Wagner, P. (2008). Action Point Models of Human Driving Behaviour. In *Traffic Simulation Workshop*.
- Wagner, P., Flötteröd, G., Nippold, R., und Flötteröd, Y.-P. (2012). Simplified car-following models. In *Transportation Research Board 91st Annual Meeting*. Transportation Research Board, Transportation Research Board.
- Wagner, P., Nagel, K., und Wolf, D. E. (1997). Realistic Multi-Lane Traffic Rules for Cellular Automata. *PHYSICA A*, 234:687–698.
- Walter, S. (2008). Rasch measurement transactions: Conceptualizing overfit or overparameterization. <http://www.rasch.org/rmt/rmt222b.htm> [Zugriff: 2016-09-19].
- Wang, Y.-P. (2008). *Optimierung der Quelle-Ziel-Matrixschätzung hinsichtlich Redundanzstörung sich verändernder Verkehrszustände*. Dissertation, Hannover, Deutschland.
- Wansart, J. (2012). *Analyse von Strategien der Automobilindustrie zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Flottenemissionen und zur Markteinführung alternativer Antriebe: Ein systemdynamischer Ansatz am Beispiel der kalifornischen Gesetzgebung*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Warner, S. L. (1961). *Stochastic Choice of Mode in Urban Travel: A Study in Binary Choice*. Metropolitan transportation series. Transportation Center at Northwestern University.
- Weemaes, G. (2016). Stromtankstellen Statistik für Deutschland. <https://www.goingelectric.de/stromtankstellen/statistik/Deutschland/> [Zugriff: 2016-06-22].
- Wegele, S. (2005). *Echtzeitorientierung für die Disposition im Schienenverkehr*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Wegener, A., Piorkowski, M., Raya, M., Hellbrück, H., Fischer, S., und Hubaux, J.-P. (2008). TraCI: An Interface for Coupling Road Traffic and Network Simulators. In *11th Communications and Networking Simulation Symposium (CNS)*.
- Wegener, M., Hübner, M., Becker, U., und Schnieder, E. (2011). Methode zur positionsbasierten Verifizierung von Fahrzeugmodellen mittels Referenzsystemen. In Trächtler, A. und Isermann, R., editors, *AUTOREG 2011 – 5. Fachtagung zur Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren*.
- Wende, D. (2003). *Fahrdynamik des Schienenverkehrs*. Lehrbuch: Maschinenbau. Vieweg+Teubner Verlag.
- Wiedemann, R. (1974). Simulation des Strassenverkehrsflusses. *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe*, 8.

- Wiedemann, R. und Reiter, U. (1992). Project ICARUS (V1052), Final Report, Appendix A: Microscopic traffic simulation: the simulation system MISSION, background and actual state. Technical Report Projekt ICARUS (V1052), CEC, Brüssel, Belgien.
- Wissen (2015). Abgasnorm. wikipedia. <https://de.wikipedia.org/wiki/Abgasnorm> [Zugriff: 2015-11-03].
- Witte, S. (1996). *Simulationsuntersuchungen zum Einfluss von Fahrerverhalten und technischen Abstandsregelsystemen auf den Kolonnenverkehr*. Dissertation, Universität Fredericana zu Karlsruhe.
- Wolsey, L. A. (1998). *Integer Programming*. John Wiley, New York, NY, USA.
- Worley, O., Klabjan, D., und Sweda, T. M. (2012). Simultaneous vehicle routing and charging station siting for commercial Electric Vehicles. In *Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International*, pages 1–3.
- WVI GmbH (2009). Verkehrsmengen im Werktagsverkehr Mo - Fr,. WVI Prof. Dr. Wermuth Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung GmbH. [https://www.braunschweig.de/leben/stadtplan\\_verkehr/verkehrsplanung/verkehrsmengen-city.pdf](https://www.braunschweig.de/leben/stadtplan_verkehr/verkehrsplanung/verkehrsmengen-city.pdf) [Zugriff: 2016-08-19].
- Yang, H., Sasaki, T., Iida, Y., und Asakura, Y. (1992). Estimation of origin-destination matrices from link traffic counts on congested networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 26(6):417–434.
- Yang, Q. und Koutsopoulos, H. N. (1996). A Microscopic Traffic Simulator for evaluation of dynamic traffic management systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 4(3):113–129.
- Zeller, R. E., Achabal, D. D., und Brown, L. A. (1980). Market Penetration and locational Conflict in Franchise Systems. *Decision Sciences*, 11(1):58–80.
- Zhang, M. und Ma, J. (2008). Developing Calibration Tools for Microscopic Traffic Simulation Final Report Part I: Overview Methods and Guidelines on Project Scoping and Data Collection.
- Zhang, M., Ma, J., und Dong, H. (2008). Developing Calibration Tools for Microscopic Traffic Simulation Final Report Part II: Calibration Framework and Calibration of Local/Global Driving Behavior and Departure/Route Choice Model Parameters.
- Zimmermann, H.-J. (2005). *Operations Research: Methoden und Modelle; für Wirtschaftsingenieure, Betriebswirte, Informatiker*. Mathematik für Wirtschaftswissenschaftler. Vieweg.

# Abbildungsverzeichnis

1.1. Elektrofahrzeuge aus den Braunschweiger Projekten <i>emil</i> und <i>InduktivLaden</i> . . . . .	7
1.2. Braunschweiger Stadtgebiet mit Hervorhebung eines beispielhaften Untersuchungsraums . . . . .	9
1.3. Konzeptioneller Ansatz und Struktur der Arbeit . . . . .	11
2.1. UML-Klassendiagramm der Konstituenten eines zu simulierenden Verkehrsszenarios	19
2.2. UML-Klassendiagramm der Konstituenten einer Verkehrsinfrastruktur . . . . .	21
2.3. Datenstruktur der Knotendefinition $\mathcal{O}$ . . . . .	22
2.4. Datenstruktur der Kantendefinition $\mathcal{E}$ . . . . .	24
2.5. Schema einer Kreuzungstopologie und dessen Abbild in SUMO . . . . .	25
2.6. Sequenz für die Erstellung einer Verkehrsinfrastrukturdefinition mit eNetEditor . .	31
2.7. UML-Klassendiagramm von Verkehrsmitteln unter Berücksichtigung ihrer Parameter	32
2.8. Zustände einer Folgefahrt nach Wiedemann [Leutzbach, 1988; PTV, 2011; Wiedemann, 1974] . . . . .	40
2.9. Sequenz für die Erstellung von Fahrzeugtypdefinitionen mit eNetEditor . . . . .	46
2.10. Kreuzungsszenario: Berechnung von Abbiegewahrscheinlichkeiten bei der Routenbildung mit DFROUTER . . . . .	49
2.11. Quelle-Ziel-Matrix eines beispielhaften Verkehrsnetzes . . . . .	53
2.12. UML-Klassendiagramm der Konstituenten zur Modellierung von Verkehrsnachfrage	55
2.13. Sequenz in eNetEditor für die Definition von Verkehrsnachfrage . . . . .	56
3.1. Kalibrierung und Validierung von Verkehrsmodellen gemäß [Detering, 2011] . . . . .	70
4.1. Kartierung der Schallimmissionen im Braunschweiger Stadtgebiet . . . . .	81
4.2. Trajektorie eines M19-Umlaufs und dessen simulierter Energiebedarf . . . . .	82
4.3. Wirkende Fahrwiderstände und Zugkraft an einem Fahrzeug . . . . .	83
4.4. Schema eines rollenden Reifens für die Herleitung von Roll- und Schwallwiderstand	85
4.5. Kinematische Größen und Kräfte des Einspurmodells gemäß [Mitschke, 2013] . . . .	86
4.6. Konservatives Teilmodell mit relevanten Fahrzeugvariablen und -parametern . . . .	94
4.7. Sankey-Diagramm der Energieflüsse bei Vortrieb ( $\Delta E_{\text{gain}} < 0$ ) . . . . .	99
4.8. Sankey-Diagramm der Energieflüsse bei Vortrieb ( $\Delta E_{\text{gain}} < 0$ ) im Schubetrieb . .	99
4.9. Sankey-Diagramm der Energieflüsse bei Rekuperation ( $\Delta E_{\text{gain}} > 0$ ) . . . . .	100
4.10. Parameteridentifikation eines nichtlinearen (Fahrzeug-)Modells . . . . .	103
4.11. Validierung des Energiemodells auf Grundlage von Simulation und Messdaten . . .	104
4.12. Residuenanalyse mit grafischer Gegenüberstellung verschiedener Fehleranteile . . .	107
5.1. Geometrische Interpretation eines linearen Programms . . . . .	113

5.2.	Beispiel eines Suchablaufs mit dem Greedy-Algorithmus . . . . .	115
5.3.	Beispiel eines Suchablaufs mit dem Branch-and-Bound-Algorithmus . . . . .	116
5.4.	Ablauf eines evolutionären Algorithmus gemäß [Pohlheim, 2013] . . . . .	118
5.5.	Beispielhaftes Straßennetz als Betrachtungsgegenstand vieler Studien über Standortprobleme im Verkehr . . . . .	122
5.6.	Vergleich einer Greedy-Suchheuristik mit optimaler Lösung eines Standortproblems	126
5.7.	Vergleich der maximin- und minimax-Ansätze bei neu zu platzierenden Knoten mit Ladestellen . . . . .	127
5.8.	Konzept für die Standortoptimierung einer Energieversorgungsinfrastruktur . . . .	132
5.9.	Räumliche Diskretisierung der Verkehrswegeinfrastruktur . . . . .	134
5.10.	Verortung potenzieller Ladedauern von Fahrzeugen an Infrastrukturkandidaten . . .	135
5.11.	Motivation für die Einführung der Big-M-Methode . . . . .	136
6.1.	Ausschnitt des östlichen Braunschweiger Stadtgebiets als Untersuchungsraum . . . .	140
6.2.	Graph der Verkehrswegeinfrastruktur im Untersuchungsraum . . . . .	142
6.3.	Untersuchungsraum dargestellt in der Braunschweiger Verkehrsmengenkarte [WVI GmbH, 2009] . . . . .	144
6.4.	Histogramme der Aufenthaltsdauern von Bussen an Haltestellen . . . . .	145
6.5.	Fahrzeugzählungen auf ausgewählten Kanten während der makroskopischen Kalibrierung mit Cadyts . . . . .	146
6.6.	Durchschnittliche Fließgeschwindigkeiten auf ausgewählten Segmenten . . . . .	147
6.7.	Histogramme von gemessenen und simulierten Fahrtauern . . . . .	148
6.8.	Histogramme von gemessenen Fahrzeughaltedauern über die Halteposition vor LSAs	149
6.9.	Gegenüberstellung von gemessenen und simulierten positionsabhängigen Haltedauern vor LSAs . . . . .	150
6.10.	Phasendiagramm der Fehlermaße während der iterativen Kalibrierung . . . . .	151
6.11.	Verlauf der FahrzeugfolgemodelLPARAMETER während der iterativen Kalibrierung . . .	151
6.12.	Validierung der mikroskopischen Kalibrierung mit Gegenüberstellung von gemessenen und simulierten positionsabhängigen Haltedauern vor LSA Hagenring/Gliesmaroder Str. . . . .	152
6.13.	Validierung der mikroskopischen Kalibrierung mit Gegenüberstellung von gemessenen und simulierten positionsabhängigen Haltedauern vor LSA Hagenring/Rebenring . . . . .	153
6.14.	Räumliche Verteilung des kumulierten Fahrzeugenergiebedarfs aller Fahrzeuge . . .	154
6.15.	Räumliche Verteilung der kumulierten Aufenthaltsdauern aller Fahrzeuge . . . . .	156
7.1.	Ergebnis: Optimale Ladestellenanordnung im Untersuchungsraum für den kollektiven Verkehr . . . . .	158
7.2.	Absoluter und spezifischer Energiebedarf aller betrachteten Fahrzeuge . . . . .	158
7.3.	Energiebilanz und spezifischer Energiebedarf aller betrachteten Fahrzeuge nach kollektiver Optimierung . . . . .	160
7.4.	Histogramm der Energiebilanzen nach Optimierung für den kollektiven Verkehr . .	160
7.5.	Anzahl erforderlicher Ladestellen als Funktion des geforderten Prozentsatzes von Verkehrsmitteln mit positiver Energiebilanz . . . . .	161



7.6. Zusammensetzung optimal angeordneter Ladestellen für die drei eingeführten Energiebedarfsklassen . . . . .	163
7.7. Ergebnis: Optimale Ladestellenanordnung im Untersuchungsraum für die drei eingeführten Energiebedarfsklassen . . . . .	163
7.8. Energiebilanz und spezif. Energiebedarf aller betrachteten Fahrzeuge nach kombinierter Optimierung für die drei eingeführten Energiebedarfsklassen . . . . .	164
7.9. Histogramm der Energiebilanzen nach kombinierter Optimierung für die drei eingeführten Energiebedarfsklassen . . . . .	164
7.10. Verlauf der im Untersuchungsraum summierten Ladeleistung über die Zeit . . . . .	165
7.11. Anzahl erforderlicher Ladestellen in Abhängigkeit der Initialisierungsdauer $T_s$ . . . . .	166
7.12. Anzahl erforderlicher Ladestellen in Abhängigkeit der Ladeleistung $P_{\text{laden}}$ . . . . .	166
7.13. Vorgehen bei der Validierung von ermittelten Ladestellenpositionen . . . . .	167
7.14. Histogramm der Energiebilanzen im realen Verkehr mit Ladestellen an den mittels Verkehrssimulationen ermittelten Standorten . . . . .	168
A.1. Aufbau eines lichtsignalgesteuerten Knotens mit Übersicht der Fahrstreifenverbindungen . . . . .	177
B.1. Signalzeit- und -zustandsplan der Kreuzung Nordstraße/Bültenweg . . . . .	185
B.2. Signalzeit- und -zustandsplan der Kreuzung Rebenring/Hagenring . . . . .	186
B.3. Signalzeit- und -zustandsplan der Kreuzung Gliesmaroder Straße/Hagenring . . . . .	186
B.4. Signalzeit- und -zustandsplan der Kreuzung Humboldtstraße/Hagenring . . . . .	187
B.5. Signalzeit- und -zustandsplan der Kreuzung Heinrichstraße/Hagenring . . . . .	187
B.6. Signalzeit- und -zustandsplan der Kreuzung Jasperallee/Hagenring . . . . .	188
B.7. Signalzeit- und -zustandsplan der Kreuzung Hans-Sommer-Straße/Langer Kamp . . . . .	188
B.8. Signalzeit- und -zustandsplan der Kreuzung Rebenring/Pockelsstraße . . . . .	189
B.9. Signalzeit- und -zustandsplan der Kreuzung Rebenring/Mittelweg . . . . .	189
B.10. Signalzeit- und -zustandsplan der Kreuzung Rebenring/Mühlenpfordtstraße . . . . .	190
B.11. Signalzeit- und -zustandsplan der Kreuzung Mühlenpfordtstraße/Wendenwehr . . . . .	190
B.12. Signalzeit- und -zustandsplan der Kreuzung Fallersleber Straße/Theaterwall . . . . .	191
B.13. Signalzeit- und -zustandsplan der Kreuzung Gliesmaroder Straße/Humboldtstraße . . . . .	191
C.1. Ein- und ausgehende Flüsse sowie Abbiegewahrscheinlichkeiten an einer Kreuzung . . . . .	193
D.1. Fahrzeugenergiebilanzen nach Optimierung für kollektiven Verkehr . . . . .	198
D.2. Fahrzeugenergiebilanzen nach kombin. Optimierung für drei Energiebedarfsklassen . . . . .	199



# Tabellenverzeichnis

1.1. Endenergiebedarf und erbrachte Verkehrsleistungen in Deutschland nach Wirtschafts- und Verkehrsbereich im Jahr 2013 . . . . .	3
2.1. Verbreitete Verkehrssimulationswerkzeuge und einige ihrer Eigenschaften . . . . .	19
2.2. Mögliche Zustände von Fahrstreifenverbindungen an LSA-gesteuerten Kreuzungen .	28
2.3. Liste möglicher Fahrzeugklassen in SUMO [DLR, 2011a] . . . . .	33
2.4. Übersicht der Parameter von verschiedenen Fahrzeugfolgemodellen . . . . .	39
2.5. Übersicht mikroskopischer Fahrzeugfolgemodelle . . . . .	42
3.1. Übersicht der kalibrierten Modellparameter aus [Detering, 2011] . . . . .	71
4.1. Im HBEFA eingeführte Fahrzeugschichten der Fahrzeugkategorie PKW [Keller, 2014]	78
4.2. Zweistufiger Umsetzungsplan der Umgebungslärmrichtlinie gemäß § 47 BImSchG .	79
4.3. Wertebereiche des Luftwiderstandskoeffizienten in Abhängigkeit der Fahrzeugform .	84
4.4. Werte des Massenzuschlags in Abhängigkeit des eingelegten Gangs und Fahrzeugtyps	90
4.5. Werte für Dauer- und Maximalleistungsaufnahme von Nebenaggregaten . . . . .	91
4.6. Parameter des vorgestellten Energiemodells . . . . .	101
4.7. Parameter der chargingStation-Klasse zur Definition von Ladestellen in SUMO . .	102
4.8. Modellparameter zur Nachbildung einer Referenzsimulation und einer Messung . .	108
4.9. Gegenüberstellung von grafischen und analytischen Ergebnissen der Modellvalidierung gegen Referenzsimulation und Referenzmessung . . . . .	109
5.1. Gegenüberstellung von Vorarbeiten über Standortoptimierung von Ladestellen . . .	129
6.1. Relative Häufigkeit der berücksichtigten Fahrzeugklassen und Fahrzeugtypen . . . .	143
6.2. Kalibrierte Modellparameter der eingeführten Fahrzeugtypen . . . . .	147
6.3. Parameter des Energiemodells für die in Abschnitt 6.3 eingeführten Fahrzeugtypen .	154
7.1. Energiebedarf und die Energiebilanz nach Optimierung der Ladestellenanordnung für den kollektiven Verkehr . . . . .	160
7.2. Energiebedarf und die Energiebilanz nach Optimierung der Ladestellenanordnung für die drei eingeführten Energiebedarfsklassen . . . . .	164